Aktive Dämpfung der Schallabstrahlung einer Reserveradmulde

Lothar Gaul[1]

[1] *Institut für Nichtlineare Mechanik, Forschergruppe Prof. Gaul, Universität Stuttgart, 70569 Stuttgart, E-Mail:lothar.gaul@inm.uni-stuttgart.de*

Kurzfassung

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse des vom Institut für Angewandte und Experimentelle Mechanik und der Daimler AG gemeinsam durchgeführten Forschungsprojektes zur aktiven Bedämpfung einer Reserveradmulde zusammen. Ziel des Projektes war die Untersuchung von aktiven Maßnahmen zur Reduktion des abgestrahlten Luftschalls einer Reserveradmulde. Dabei wird mit Hilfe piezoelektrischer Flächenwandler eine vergleichbare Reduktion erzielt, wie sie im Serienfahrzeug durch eine passive Schwerematte erreicht wird. Das Projekt war in die drei Phasen der Voruntersuchung, Testimplementierung im Labor und Implementierung am Fahrzeug gegliedert. Die Ergebnisse der Voruntersuchung, bei welcher die erste Schwingungsmode als Hauptursache für den abgestrahlten Luftschall bestätigt wurde, sind in einem gesonderten Zwischenbericht zusammengefasst.

Ausgangssituation und Zielsetzung

Bei der untersuchten Struktur handelt es sich um die Reserveradmulde eines Mercedes W212. Das betrachtete akustische Phänomen äußert sich bei der Fahrt mit 80 km/h auf rauem Asphalt und bei leerer Reserveradmulde durch ein tieffrequentes Wummern im Fahrzeuginnenraum. Bei der in Abbildung 1 dargestellten Messung des Schalldrucks während einer Testfahrt ist deutlich eine Überhöhung bei etwa 62 Hz im Frequenzspektrum zu erkennen.

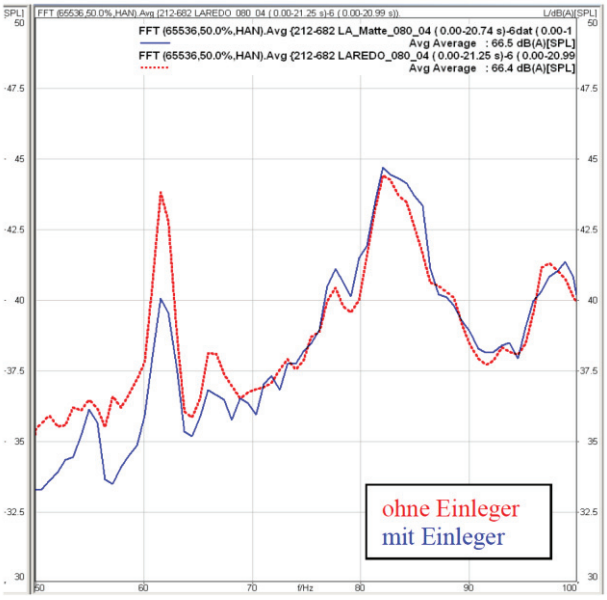

Abbildung 1: Frequenzspektrum des Schalldrucks im Fahrzeuginnenraum bei 80 km/h auf rauem Asphalt (Quelle: Daimler AG).

In der Serienausführung des Fahrzeugs ohne Reserverad ist das Problem mit Hilfe einer Schwerematte behoben. Die Matte besitzt eine Masse von 1,13 kg und wird direkt in die Mulde gelegt. Durch die zusätzliche Masse und Materialdämpfung, sowie die erhöhte Dämpfung an der gesamten Auflagefläche reduziert der Einleger die Strukturschwingung und damit den in den Innenraum abgestrahlten Luftschall effektiv.

Ziel des abgeschlossenen Projektes war es, exemplarisch am Beispiel der Reserveradmulde die Wirksamkeit von aktiven Maßnahmen zur Bedämpfung von Strukturschwingungen und des dadurch abgestrahlten Luftschalls zu demonstrieren. Im Folgenden werden die Schritte zur Vorbereitung und Applikation der Regelung mit Hilfe piezoelektrischer Flächenwandler beschrieben.

Methode

Hardware-Aufbau

Zur aktiven Regelung der Strukturschwingungen wurden zwei Arten von piezoelektrischen Flächenwandlern auf die Reserveradmulde aufgeklebt. Als Aktuatoren dienen DuraAct P-876.A12 der Firma PI Ceramic GmbH. Diese 61mm x 35mm großen Flächenwandler basieren auf dem piezo-elektrischem Keramikmaterial PIC255. Die Wandler sind bereits unter Vorspannung in Kunststoff einlaminiert und besitzen Lötpunkte für die Verkabelung der Elektroden. Trotz der Keramikbasis sind diese Elemente biegsam und können auf gekrümmten Oberflächen aufgebracht werden. Auf die Reserveradmulde wurden die Flächenwandler mit dem Epoxidkleber Loctite Hysol 9466 aufgeklebt. Vier dieser DuraAct-Wandler werden, wie in Abbildung 2 dargestellt, als Aktuatoren und einer als Sensor verwendet. Des weiteren ist ein Foliensensor aus Polyvinylidenfluorid (PVDF) aufgeklebt.

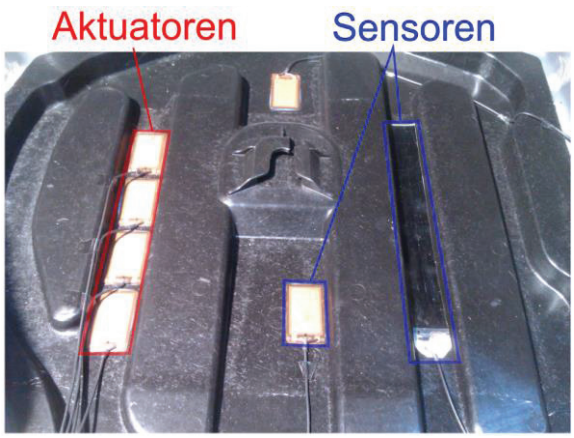

Abbildung 2: Platzierung der piezoelektrischen Flächenwandler als Sensoren und Aktuatoren.

Die Folie der Firma Measurement Specialities (P/N: 3-1003702-4) besteht aus einem 110 µm dicken PVDF-Film, welcher beidseitig mit NiCu-Elektroden beschichtet ist. Die Folie lässt sich mit einer Schere schneiden und kann deshalb einfach verarbeitet werden. Zur Kontaktierung der Elektroden wurden die Kabel zunächst auf eine Kupferfolie gelötet, welche anschließend mit Leitkleber auf die Folie geklebt wurden. Die PVDF-Folie selber ist mit doppelseitigem Klebeband auf die Kunststoffmulde aufgeklebt.

Der Regelkreis ist, wie in Abbildung 3 dargestellt, über folgende Hardwarekomponenten geschlossen:

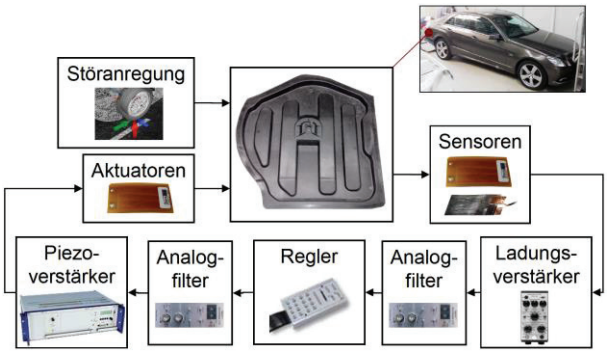

Abbildung 3: Hardware-Aufbau des Regelkreises.

- Wandlung der Sensor-Ladungssignale in Spannungssignale mit Ladungsverstärker (Bruel&Kjaer 2635).
- Zur Reduktion des Spillover-Effekts (ungewollte Anregung nicht modellierter Schwingungsmoden) werden die Sensorsignale durch analoge Tiefpassfilter mit einer Trennfrequenz von 250Hz gefiltert.
- Der eigentliche Regelalgorithmus läuft auf einem digitalen Echtzeitsystem der Firma dSpace mit einem Regeltakt von 10 kHz.
- Zur Glättung des digital erzeugten Steuersignals wird der Ausgang des dSpace-Systems durch einen analogen Tiefpassfilter mit Trennfrequenz von 5 kHz gefiltert.
- Ein Piezoverstärker vom Typ PI E-507.00 verstärkt das Steuersignal, welches anschließend auf die Piezoaktuatoren gegeben wird.

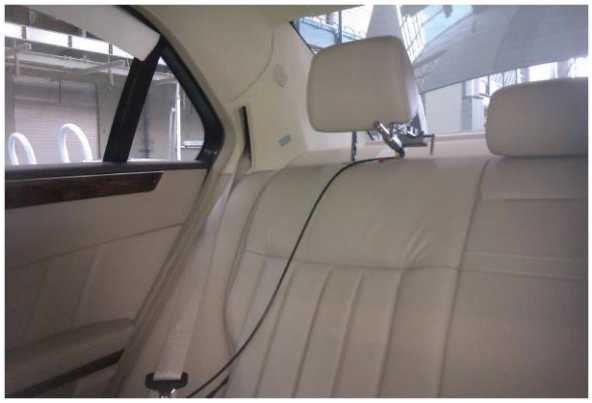

Abbildung 4: Mikrophon zur Erfassung des Schalldrucks im Innenraum.

Zur Simulation der Fahrbahnanregung wird die Reserveradmulde mittig mit einem Shaker angeregt. Für eine Validierung der aktiven Maßnahme wird der Körperschall mit Hilfe eines Beschleunigungssensors auf der Reserveradmulde und der Schalldruck im Innenraum mit einem Mikrophon auf Kopfhöhe gemessen. Abbildung 4 zeigt die Position des Mikrophons.

Reglerentwurf

Der Reglerentwurf zur aktiven Dämpfung der Reserveradmulde wurde in drei Schritten durchgeführt:

1. Identifikation / Korrektur Aktuatornichtlinearität
2. Identifikation eines linearen Zustandsraummodells der Regelstrecke
3. Entwurf Linear-Quadratic-Gaussian-Regler (LQG)

Nichtlinearität der Piezoaktuatoren

Um den Arbeitsbereich der piezoelektrischen Aktuatoren möglichst optimal auszunutzen, wurde zunächst das statische Antwortverhalten der Regelstrecke gemessen. Dazu wurden die Aktuatoren mit einer sinusförmigen Spannung von 10 Hz beaufschlagt. Der aufgespannte Wertebereich (Nullpunkt und Amplitude des Sinus) wurde dabei sukzessiv vergrößert und dabei das Antwortsignal der Sensoren aufgezeichnet. Der Arbeitsbereich der Aktuatoren wurde so auf -50V bis 800V ermittelt. Auf Grund der Nachpolarisierung des piezoelektrischen Materials der Aktuatoren im Betrieb, ist der Zusammenhang zwischen angelegter Spannung und Strukturauslenkung nicht-linear. Die blaue Kurve in Abbildung 5 zeigt die piezo-typische Hysterese des Antwortverhaltens.

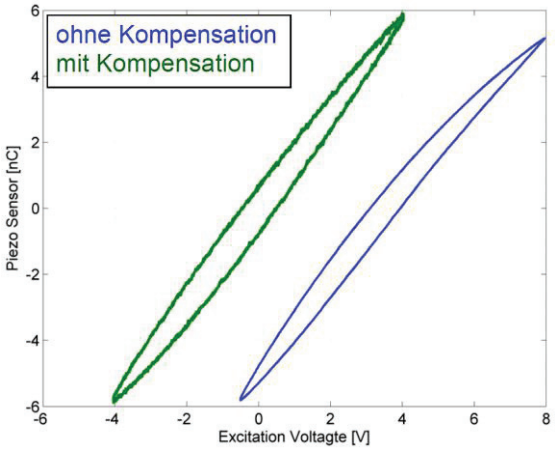

Abbildung 5: Nichlinearität der Piezoaktuatoren mit und ohne einfacher Kompensation.

Dargestellt ist hier das Signal des Piezosensors über der Spannung zum Piezoverstärker (Verstärkungsfaktor 100). Eine komplette Kompensation des Hystereseverhaltens ist nach wie vor Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben und konnte nicht im Rahmen dieses Projektes durchgeführt werden. Zur Verbesserung der Regelgüte wurde jedoch die Krümmung der Kurve mit Hilfe eines Polynoms dritten Grades angenähert und über die Inverse kompensiert. Zudem wurde der Mittelpunkt des Arbeitsbereich zur Null verschoben.

Zustandsraummodell der Regelstrecke

Zur Identifikation der Regelstrecke wurde das Übertragungsverhalten von Piezoaktuatoren zu den Piezosensoren im Frequenzbereich bis 450Hz aufgezeichnet. Wie in Abbildung 6 dargestellt, ist deutlich die Eigenfrequenz der Reserveradmulde bei 64 Hz zu erkennen.

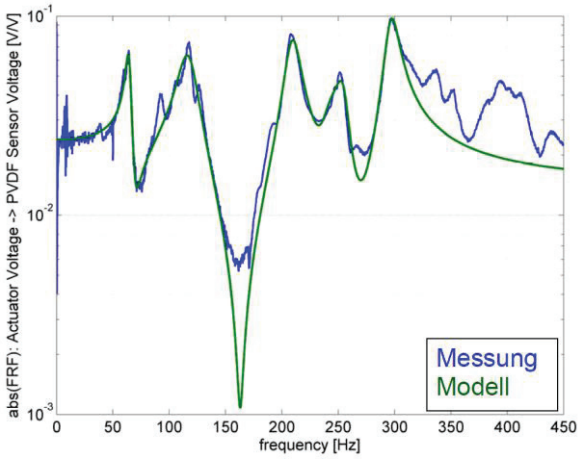

Abbildung 6: Betrag der gemessenen und modellierten Übertragungsfunktion der Regelstrecke.

Die Modellierung der Systemdynamik wurde in einem Zweischrittverfahren durchgeführt:

1. Zunächst wurde eine Systemrealisierung nach Ho und Kalman durchgeführt. Das Verfahren benötigt außer der gewünschten Systemordnung und den, aus Messdaten berechneten Impulsantworten keine weiteren Vorgaben. Das Ergebnis ist ein lineares Zustandsraummodell, welches optimal die gegebenen Impulsantworten synthetisiert.
2. Im zweiten Schritt wurden die Systemmatrizen nochmals mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens im Frequenzbereich optimiert. Hierzu wird ein Levenberg–Marquardt-Algorithmus mit logarithmischer Zielfunktion verwendet, welche die Abweichung zwischen gemessener und synthetisierter Übertragungsfunktion bewertet.

Abbildung 6 zeigt ebenfalls die Übertragungsfunktion des identifizierten Modells. Das Modell bildet die Dynamik der Regelstrecke bis zu einer Frequenz von etwa 320 Hz gut ab. Entscheidend ist dabei, dass die Dynamik bis über die Trennfrequenz des analogen Tiefpassfilters gegen Spillover abgebildet ist.

Das gewonnene System liegt als Zustandsraummodell der Form

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \tag{1}$$

vor. Das Modell bildet zwar die Dynamik der Regelstrecke optimal ab, der Systemzustand x hat allerdings keine direkte physikalische Bedeutung. Deshalb wird das Modell in die modale Darstellung

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} A_{m1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & A_{mn} \end{bmatrix} \cdot \eta + \begin{bmatrix} B_{m1} \\ \vdots \\ B_{mn} \end{bmatrix} \cdot u \tag{2}$$

$$y = \begin{bmatrix} C_{m1} & \cdots & C_{mn} \end{bmatrix} \cdot \eta + D \cdot u$$

transformiert. Die Systemmatrix nimmt dabei eine Blockdiagonalform an, bei der jeder 2x2-Block

$$A_{mi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i^2 & -2\delta_i\omega_i \end{bmatrix} \tag{3}$$

jeweils einer Schwingungsmode entspricht. Der Zustandsvektor beschreibt nun die Auslenkungen und Geschwindigkeiten der einzelnen Moden:

$$\eta_i = \begin{bmatrix} q_{mi} \\ \dot{q}_{mi} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Reglerentwurf

Zur selektiven Regelung einzelner Moden wurde ein Zustandsregler nach dem LQRVerfahren entworfen. Das Regelgesetzt des Zustandsreglers bildet den gesamten Zustandsvektor auf die Stellgrößen ab:

$$u = -K\eta \tag{5}$$

Die Regelmatrix K wird dabei so gewählt, dass folgende Gütefunktion minimiert wird:

$$J = \int_0^\infty \left(\eta^T Q \eta + u^T R u\right) dt \tag{6}$$

wobei Q die Gewichtungsmatrix der einzelnen Zustände und R die Gewichtungsmatrix der Stellgröße darstellt. Zur Regelung der ersten Mode werden alle Einträge der Q-Matrix, außer den ersten beiden Diagonalelemente (modale Auslenkung und Geschwindigkeit der ersten Mode) zu Null gewählt. Die R-Matrix ist im Fall eines einzelnen Aktuatorsignals ein Skalar, welcher dazu verwendet wird, die Stellgrößenbeschränkung einzuhalten. Je größer R gewählt wird, desto mehr wird die Stellgröße in der Gütefunktion (6) gewichtet. Die für die Gütefunktion optimale Zustandsrückführung K ergibt sich nach dem LQR-Entwurfverfahren zu

$$K = R^{-1}B^T S \tag{7}$$

wobei S die Lösung der algebraischen Riccatigleichung

$$A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q = 0 \tag{8}$$

ist.

Beobachterentwurf

Zur Rekonstruktion des Zustandsvektors, welcher vom Zustandsregler in Echtzeit benötigt wird, kommt ein Kalmanfilter zum Einsatz. Dieser simuliert das Zustandsraummodell (2) und liefert durch die

Ausgangsgleichung virtuelle Messwerte. Die Differenz zwischen echten und virtuellen Messwerten wird dazu verwendet die Simulation zu stabilisieren und damit Modellungenauigkeiten und Messrauschen auszugleichen. Sobald der Beobachter eingeschwungen ist, wird der Zustandsvektor aus der Simulation ausgelesen und dem Zustandsregler zur Verfügung gestellt. Das Gesamtsystem, bestehend aus Beobachter und Zustandsregler kann wieder zu einem Zustandsraummodell zusammengefasst werden, welches sich sehr effizient in einem Echtzeitsystem umsetzen lässt. Die Verwendung eines Kalmanfilters in Verbindung mit einem LQR-Zustandsreglers wird auch als LQG-Verfahren bezeichnet.

Ergebnisse

Die Wirksamkeit der aktiven Regelung wurde in zwei Schritten untersucht:

1. Zunächst wurde die Reserveradmulde über den Shaker mit einem Sinussignal bei 64 Hz (Anregung bei erster Eigenfrequenz) und der abgestrahlte Luftschall am Referenzmikrophon im Fahrzeuginnenraum gemessen. Abbildung 7 zeigt den Zeitverlauf der aufgezeichneten Signale. Zum Zeitpunkt der vertikalen Markierung wurde der Regler eingeschaltet. Während der Shaker (obere Verlauf) mit konstanter Amplitude die Reserveradmulde anregt, reduziert sich der abgestrahlte Luftschall deutlich (mittlere Verlauf). Das Stellsignal des Reglers bleibt dabei im Bereich zwischen ±1,5V (untere Verlauf), die Piezoaktuatoren werden also mit ±150V um den Arbeitspunkt beaufschlagt.
2. Im zweiten Schritt wurde die Wirkung des Reglers auf eine breitbandige Anregung untersucht. Dazu wurde die Reserveradmulde über den Shaker mit einem Rauschsignal beaufschlagt. Dabei wurde wieder der akustische Druck am Referenzmikrophon und das Spannungssignal zum Shaker aufgezeichnet. Die Messung wurde in drei Varianten durchgeführt, wobei jede Messung zehn mal wiederholt wurde um die Berechnung der Übertragungsfunktion von Shakersignal zum akustischen Druck mitteln zu können. In der erste Variante wurde die ungeregelte Reserveradmulde ohne Schwerematte vermessen, in der zweiten Variante die geregelte Reserveradmulde ohne Schwerematte und in der dritten Variante die ungeregelte Reserveradmulde mit Schwerematte. Abbildung 8 zeigt den Betrag der Übertragungsfunktionen aller drei Varianten. Im Vergleich wird deutlich, dass die implementierte Regelung die erste Schwingungsmode effektiv dämpft, ohne dabei höhere Moden zu beeinflussen. Da die erste Mode signifikant für den abgestrahlten Luftschall verantwortlich ist, reduziert sich die H_∞-Norm durch die aktive Maßnahme um 4,9 dB.

Die H_∞-Norm der Übertragungsfunktion bei eingelegter Schwerematte weist eine Reduktion von 7,5 dB auf. Beim Vergleich der aktiven mit der passiven Maßnahme sollte jedoch beachtet werden, dass die Schwerematte nicht nur die Dämpfung erhöht, sondern ebenfalls die bewegte Masse an der Reserveradmulde signifikant erhöht. In dem

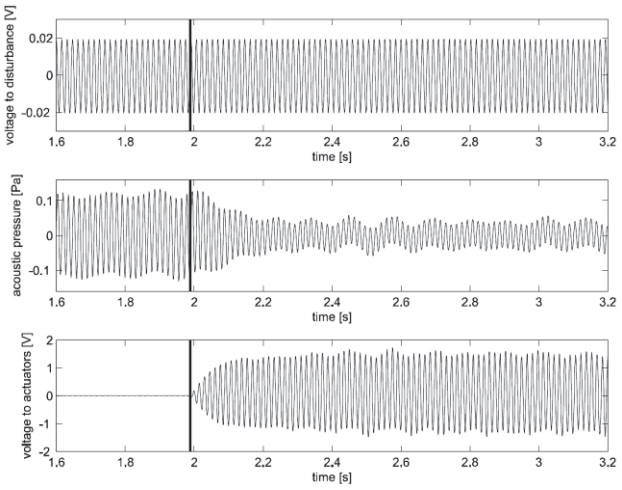

Abbildung 7: Zeitlicher Signalverlauf der Störanregung, des akustischen Drucks im Innenraum und der Stellgröße zu den Piezoaktuatoren beim Einschalten des Reglers.

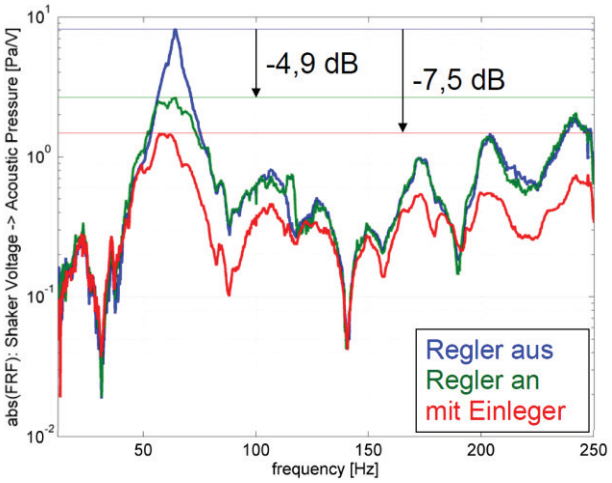

Abbildung 8: Betrag der Übertragungsfunktion von der Störanregung an der Reserveradmulde zum akustischen Druck im Fahrzeuginnenraum.

durchgeführten Experiment ist die Kraftanregung durch den Shaker konstant, was insgesamt zu einer kleineren Anregung führt. Die gesamte Übertragungsfunktion ist also nach unten verschoben. Diese Reduktion des Übertragungspfades bildet jedoch nur dann das Verhalten während einer echten Fahrsituation ab, wenn die Reserveradmulde dort ebenfalls durch konstante Kräfte angeregt wird (beispielsweise die aerodynamische Anregung durch den Fahrtwind). Die Anregung durch Körperschall, also beispielsweise eine Relativbewegung der umschließenden Karoserie lässt sich mit einer konstanten Kraftanregung nicht abbilden.

Literatur

[1] Gaul, L.; Engelke, S.: Aktive Maßnahme zur Bedämpfung einer Reserveradmulde, Abschlussbericht, Institut für Angewandte und Experimentelle Mechanik, Universität Stuttgart, 2011.

[2] Engelke, S.: Experimental System Identification for Modal State Reconstruction and Active Vibration Control. Der Andere Verlag. Dissertation, Universität Stuttgart, 2012.