

PKW-Innenlärmreduzierung durch aktive Beruhigung der durch die Motorharmonischen erregten Dachblech-Schwingungen

Tom Weyer, Hans Peter Monner

1. Einleitung

Eine Schallquelle im PKW stellt das Dach dar, welches u.a. durch den Motor zu Schwingungen angeregt wird. Fallen bestimmte Motorharmonische mit den Resonanzfrequenzen des Daches zusammen, kann es im Fahrgastinnenraum zu unerwünschter Schallabstrahlung kommen, die den Komfort beeinträchtigt. Ein Ansatz zur Vermeidung dieses Effektes sind passive Schalldämmmaßnahmen, die in modernen Fahrzeugen teilweise schon recht zufriedenstellend eingesetzt werden. Nachteilig an diesen passiven Maßnahmen ist allerdings, dass auf sich verändernde Betriebsbedingungen nicht reagiert werden kann. Daher wird in dieser Veröffentlichung der Ansatz der aktiven Schwingungskompensation mittels adaptiver Komponenten verfolgt. Die Idee liegt in der Einleitung von Gegenschwingungen, die durch Auslöschung zu einer Verringerung der Dachschwingungen beitragen und so auch die Schallabstrahlung reduzieren. Hierbei geht es lediglich um prinzipielle Untersuchungen, d.h. es werden keine akustischen Untersuchungen mit Mikrofonen vorgestellt. Die dargelegten Arbeiten wurden im Rahmen des vom BMBF geförderten Leitprojekts ADAPTRONIK an der Rohkarosserie eines Volkswagen Bora durchgeführt. Zur aktiven Schwingungseinleitung und sensorischen Erfassung kamen dabei piezokeramische Folienmodule zum Einsatz.

2. Modalanalyse der Rohkarosserie

Im ersten Schritt wurde an der Rohkarosserie eine Modalanalyse durchgeführt. Diese Untersuchungen dienen der Gewinnung der Modaldaten Eigenfrequenz, Eigenform und modale Dämpfung. Deren Kenntnis ist für die Entwicklung der Regelung von entscheidender Bedeutung.

2.1 Versuchsaufbau

2.1.1 Prinzip

Der zur experimentellen Analyse des passiven Systems der Rohkarosserie verwendete, schematische Versuchsaufbau ist in Bild 1 zu sehen. Das Autodach wird entweder direkt oder über die Karosserie durch einen Shaker mit definierten Testsignalen angeregt. Die auf dem Laborrechner gewählten Testsignale werden von einem Signalgenerator erzeugt und über einen Verstärker an den Shaker weitergegeben. Die Messung des Schwingungsverhaltens des Daches geschieht mit einem Laserscanning-Vibrometer, das mittels Lasers die Geschwindigkeit fixierter Punkte der Struktur ermittelt. Da das Reflexionsvermögen des Daches für diese Zwecke zu gering ist, wurde es zur Verbesserung der Qualität der Messung mit einem Punktraster aus reflektierender Folie beklebt, so dass das Vibrometer alle Punkte der Reihe nach scannen kann. Das Raster hat die Größe von $17 \times 11 = 187$ Punkten (siehe Bild 2).

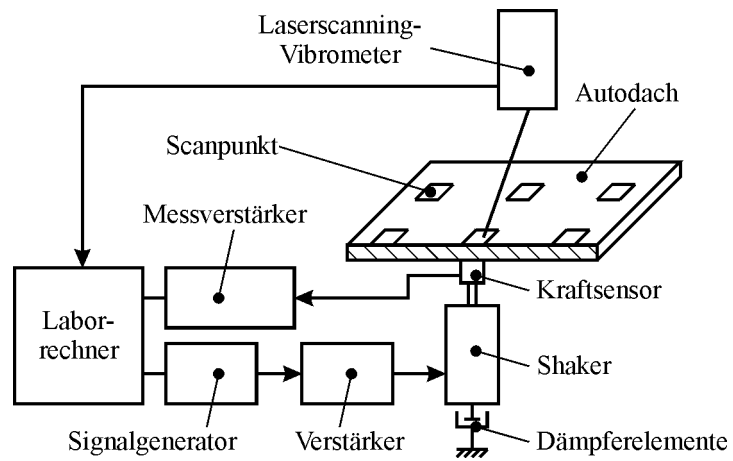


Bild 1: Schematischer Versuchsaufbau

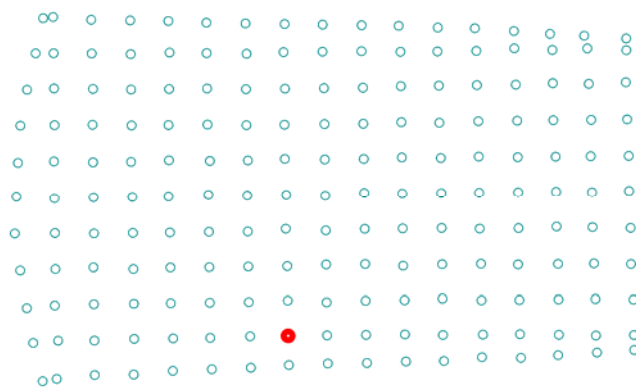


Bild 2: Punktraster mit Shakerposition

2.1.2 Realisierung



Bild 3: Realisierter Versuchsaufbau

In Bild 3 ist der realisierte Versuchsaufbau abgebildet. Oben sieht man das Laser-Scanning-Vibrometer auf einer Hebebühne stehen. Die Rohkarosserie ist links unten, die Mess- und Ansteuerelektronik rechts unten zu sehen.

In ersten Voruntersuchungen wurde die auf den Rädern stehende Karosserie am Längsträger im Motorraum durch einen Shaker angeregt. Dabei zeigte sich eine starke Ausbildung von Starrkörpermoden. Um diesen Effekt zu vermeiden und damit die Qualität der Messung zu erhöhen, wurde die Karosserie für die weiteren Untersuchungen nicht über das Fahrwerk gelagert, sondern direkt am Boden befestigt. Die Vorderachse liegt dabei auf einem U-Träger, der von zwei Böcken gehalten wird (siehe Bild 4).



Bild 4: Lagerung der Vorderachse

Unter den beiden hinteren Anhebepunkte der Karosserie stehen zwei Stützen. Mittels vier Gewindestangen, die durch eigens dafür gebohrte Löcher geführt sind, ist die Karosserie mit dem Boden der Versuchshalle fest verbunden. Das Karosserie-Dach wird direkt an der Position eines definierten Scanpunktes durch einen Shaker von innen angeregt, um die ins Dach eingeleitete Kraft mit einem Kraftsensor genau bestimmen zu können. Der Shaker steht auf einer beidseitig auf höhenverstellbaren Böcken gelagerten, hölzernen Bühne, die durch die Aussparungen für die Hintertüren durch das Auto reicht (siehe Bild 5). Bei der Konstruktion der Bühne musste auf deren Steifigkeit und Schwingungsverhalten keine besondere Rücksicht genommen werden, da die eingebrachten Kräfte ziemlich klein sind und der Kraftsensor jede Krafteinwirkung registriert. Um möglichst wenig Energie in den Boden und damit auf Umwegen wieder in die Struktur einzuleiten, ist der Shaker auf dämpfenden Elementen gelagert. Das Spannungssignal des Kraftsensors wird zur Weiterverarbeitung durch den Laborrechner von einem Messverstärker verstärkt. Der Laborrechner berechnet schließlich aus dem Kraftsignal und den Geschwindigkeitssignalen für jeden Rasterpunkt einen entsprechenden Frequenzgang, der am Monitor darstellbar ist. Die Ergebnisse der Analysen werden im Universal-File-Format (UFF) abgespeichert.



Bild 5: Shakerbühne

2.2 Ermittlung der Modaldaten

Speziell zur Ermittlung der Modaldaten wurde eine Matlab-Toolbox entwickelt [1], die aus den in einem Universal-File abgespeicherten Frequenzgängen die Modaldaten einer Struktur ermittelt. Bezüglich der im Rahmen des Leitprojektes ADAPTRONIK untersuchten Rohkarosserie musste also zunächst ein geeignetes Universal-File erzeugt werden. Hierfür wurde der in Abschnitt 2.1. erläuterte Versuchsaufbau verwendet. Der Shaker wurde dabei mit einem Periodic-Chirp-Signal im Bereich von 10-100 Hz angesteuert. Die Ermittlung der Frequenzgänge und Abspeicherung in einem Universal-File erfolgte durch die zu dem Laser-Scanning-Vibrometer gehörende Software der Firma Polytec. Die entwickelte Matlab-Toolbox arbeitet nach dem Prinzip der Frequenzganganpassung. Dabei werden die Parameter der Ansatzfunktion

$$G_m(j\omega) = \sum_{n=1}^N \frac{a_{mn} + b_{mn}j\omega}{-\omega^2 - 2j\omega\delta_n + (\omega_{r,n}^2 + \delta_n^2)}$$

N : Anzahl der Moden

m : Nummer des Rasterpunktes, $m = 1..M$

in zwei Schritten angepasst: Im ersten Schritt werden die gedämpften Eigenfrequenzen $\omega_{r,n}$ und Abklingkonstanten δ_n durch Minimierung einer quadratischen Fehlerfunktion bestimmt. Die Lehrschen Dämpfungen können mit der Gleichung

$$D = -\delta_n \sqrt{\frac{1}{\delta_n^2 + \omega_{r,n}^2}}$$

aus den Abklingkonstanten und gedämpften Eigenfrequenzen bestimmt werden. Im zweiten Schritt werden die Zählerkoeffizienten a_{mn} und b_{mn} durch Lösung des Gleichungssystems Messwert = Ansatzfunktion mittels der Pseudoinversen ermittelt. Durch dieses Verfahren können die Eigenwerte und -vektoren der untersuchten Struktur identifiziert werden.

2.3 Ergebnis der Modalanalyse

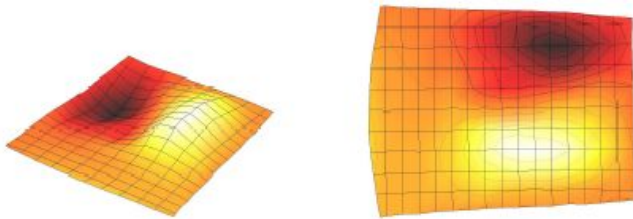
Die mittels der Matlab-Toolbox ermittelten ersten sechs Eigenfrequenzen, Eigenformen und modalen Dämpfungen sind in den folgenden Bildern dargestellt. Die theoretisch existierende erste Eigenform konnte messtechnisch nicht erfasst werden.

2. Eigenform

Gedämpfte Eigenfrequenz: 42,928 Hz

Lehrsche Dämpfung: 0,8681 %

Abklingkonstante: -2,342 rad/s

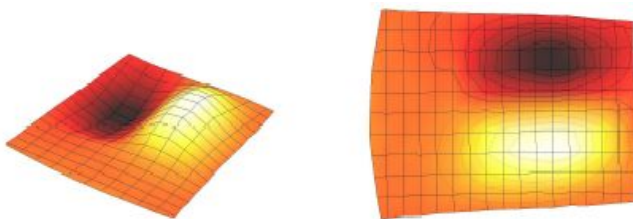


3. Eigenform

Gedämpfte Eigenfrequenz: 46,514 Hz

Lehrsche Dämpfung: 0,8495 %

Abklingkonstante: -2,483 rad/s

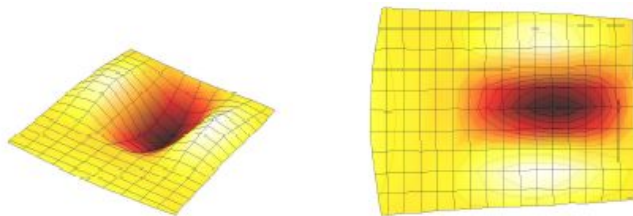


4. Eigenform

Gedämpfte Eigenfrequenz: 51,582 Hz

Lehrsche Dämpfung: 0,4789 %

Abklingkonstante: -1,552 rad/s

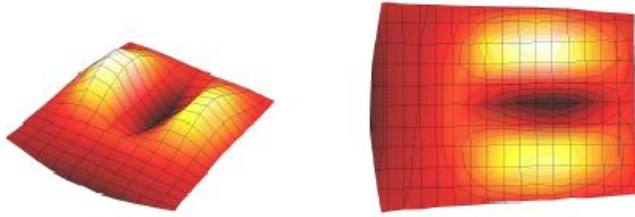


5. Eigenform

Gedämpfte Eigenfrequenz: 53,196 Hz

Lehrsche Dämpfung: 1,154 %

Abklingkonstante: -3,858 rad/s

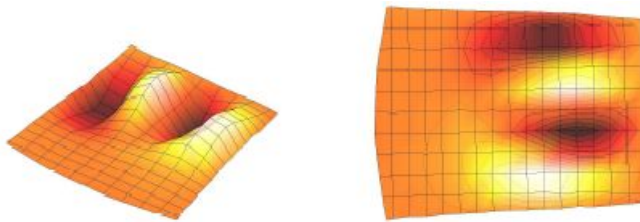


6. Eigenform

Gedämpfte Eigenfrequenz: 62,288 Hz

Lehrsche Dämpfung: 0,5107 %

Abklingkonstante: -1,999 rad/s



3. Entwicklung des adaptronischen Systems

Nachdem die Modaldaten der Struktur bestimmt wurden, kann jetzt das aktive System entwickelt werden. Hierfür bietet sich der Einsatz der Adaptronik, d.h. eines adaptronischen Systems, an. Ein adaptronisches System besteht aus den Komponenten

- Aktoren
- Sensoren
- Regelung
- Ansteuerelektronik
- Struktur

In den folgenden Abschnitten werden die Schritte zur Entwicklung des adaptronischen Systems beschrieben.

3.1 Bestimmung der optimalen Aktor-/Sensorpositionen

Durch FE-Modellierung und Vergleich mit den Messdaten konnten durch Überlagerung der berechneten Dehnungen der ersten fünf Biegemoden Beobachtbarkeits- und Steuerbarkeitskriterien für die Auswahl von optimalen Sensor- bzw. Aktuatorpositionen bestimmt werden. An diesen optimalen Positionen wurden sechs doppelagige Aktor- und sechs einlagige Sensor-Piezofolienmodule jeweils nebeneinander auf der Innenseite des Dachblechs der Rohkarosse appliziert (siehe Bild 6).

3.1 Identifikation der Regelstrecke

Zur Reglerauslegung wurden vier Aktor- und vier Sensormodule ausgewählt. Als Aktoren kamen die Piezofolienmodule A1, A4, A5, A6 und als Sensoren die Piezofolienmodule S1, S4, S5, S6 zum Einsatz (siehe Bild 6).

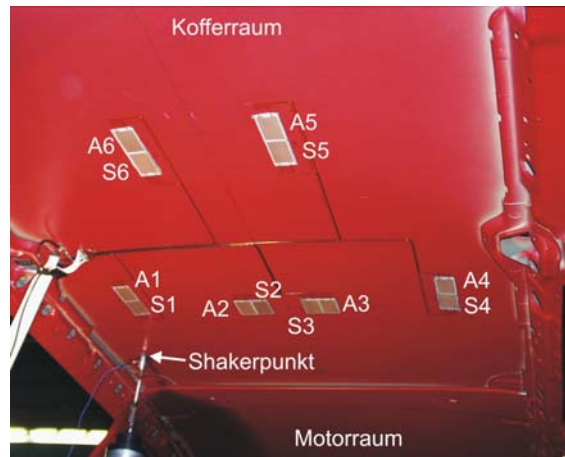


Bild 6: Position der Piezofolienmodule

Zur Reglerauslegung wurde eine Identifikation der Regelstrecke im Zustandsraum durchgeführt. Hierfür wurden die 16 Frequenzgänge zwischen den Aktor- und Sensormodulen aufgenommen und aus diesen Daten ein Startmodell im Zustandsraum mittels FORSE (Frequency Domain Observability Range Space Extraction) [2] bestimmt. Durch nichtlineare Optimierung wurde dieses an die gemessenen Frequenzgänge angepasst. In Bild 7 bis 10 sieht man den Vergleich zwischen Modell und Messung der quasi-kollokalen Aktor-Sensorpaare.

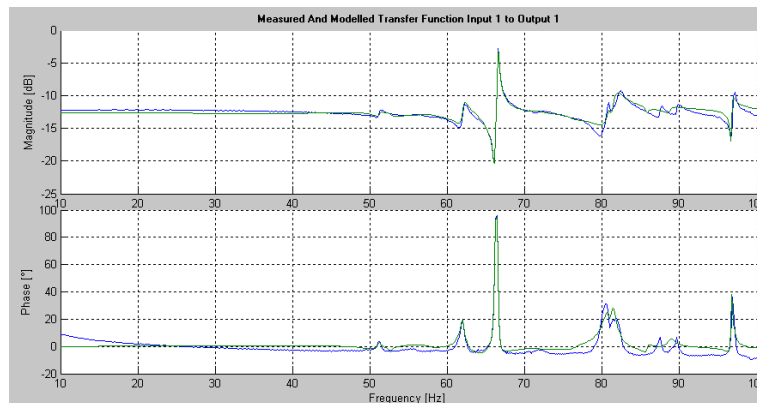


Bild 7: Vergleich Modell (---) / Messung(---) Sensor S1 Aktor A1

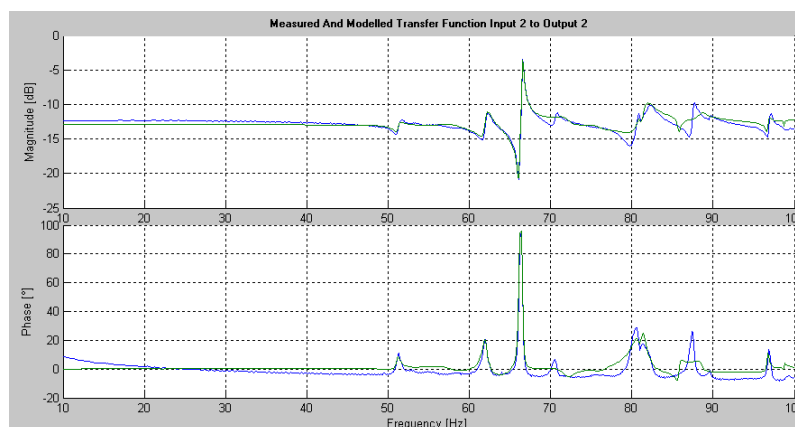


Bild 8: Vergleich Modell (---) / Messung(---) Sensor S4 Aktor A4

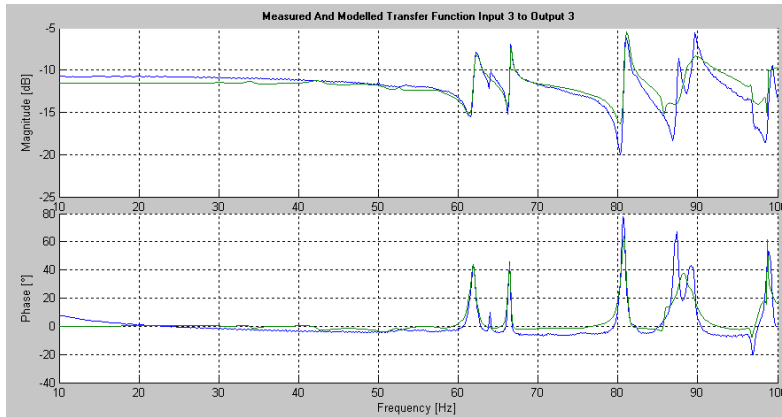


Bild 9: Vergleich Modell (---) / Messung(--) Sensor S5 Aktor A5

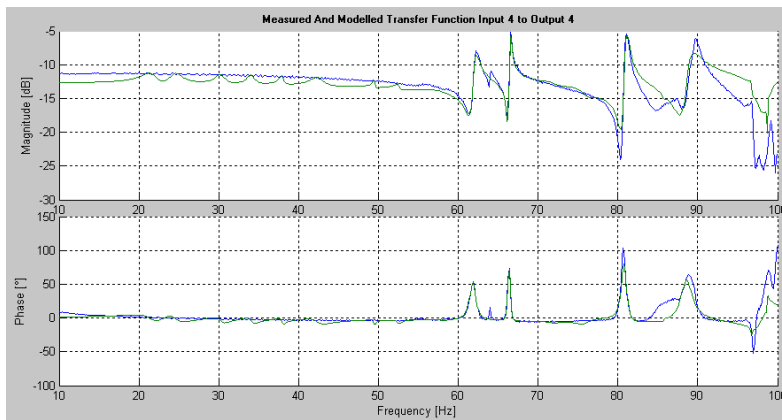


Bild 10: Vergleich Modell (---) / Messung(--) Sensor S6 Aktor A6

3.2 Regelungskonzept

Das an der Rohkarosserie verwendete Regelungskonzept basiert auf dem bekannten Leaky FXLMS-Algorithmus (Filtered X Least-Mean-Square) [3]. Aus der Prinzipskizze in Bild 11 wird deutlich, dass bei diesem Regelungskonzept die Störgrößen über ein adaptives Filter auf die Regelstrecke geschaltet werden.

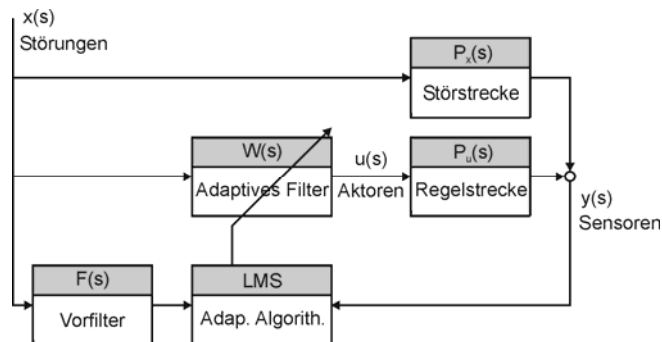


Bild 11: Prinzip des FXLMS-Algorithmus

Für die aktive Regelung des Dachs der Rohkarosserie wurde hierfür die Ansteuerung des erregenden Shakers verwendet. Das für den FXLMS-Algorithmus nö-

tige Vorfilter wurde durch das im Abschnitt 3.1 identifizierte Zustandsraummodell realisiert. Bei der gesamten Regelung handelt es sich um vier getrennte SISO-Regelungen der jeweiligen kollokalen Aktor-/Sensorpaare. Die Regelungsimpementierung erfolgte auf einem dSpace 1005 Power PC System bei einer Abtastfrequenz von 1 kHz.

3.2 Regelungsergebnisse

Das Ziel der implementierten Regelung war die Reduktion der ersten fünf messbaren Biegemoden des Dachs der Rohkarosserie bei breitbandiger und monofrequenter Anregung. In Bild 12 und 13 sind die Störübertragungsfunktionen Shakerkraft zu Sensorsignale bei ein- und ausgeschalteter Regelung dargestellt. Man erkennt deutlich das hervorragende Erreichen dieses Regelungsziels bei breitbandiger Anregung und Messung mit den zur Regelung verwendeten Sensorpiezofolienmodulen.

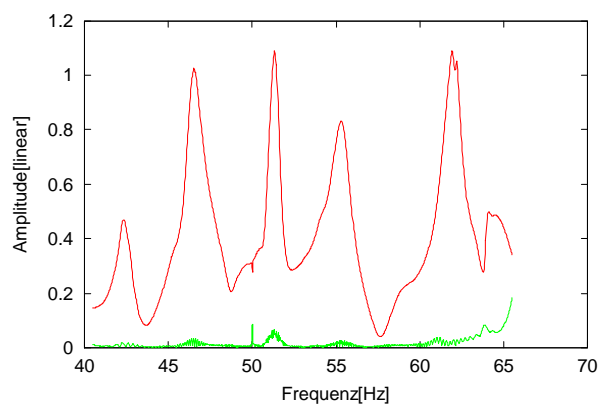


Bild 12: Geregelte (--) / unregelte (--) Störübertragungsfunktion bei Messung mit Sensor S1

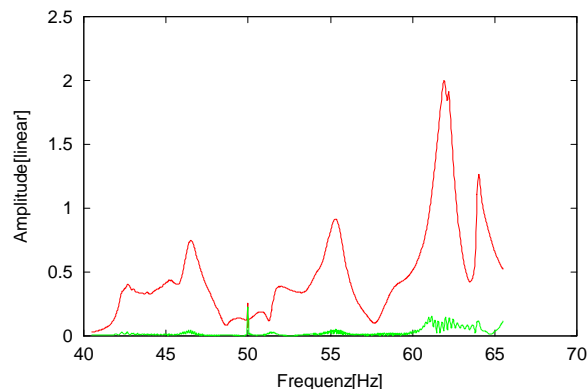


Bild 13: Geregelte (--) / unregelte (--) Störübertragungsfunktion bei Messung mit Sensor S6

Die Amplitudenreduktionen liegen im Bereich von 20 –30 dB. Bei monofrequenter Anregung der ersten fünf messbaren Biegemoden wird ebenfalls eine exzellente Schwingungskompensation erzielt (siehe Bild 14 bis 16).

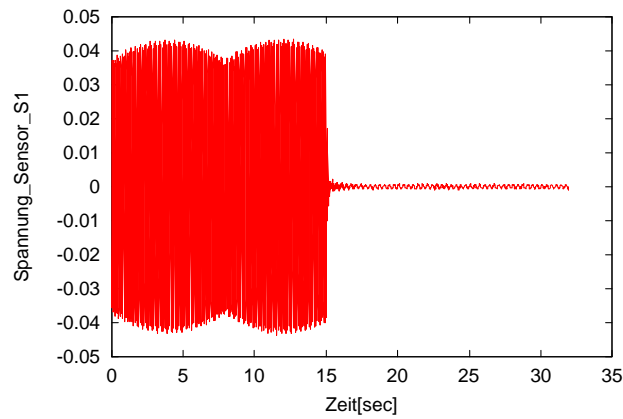


Bild 14: Kompensation einer monofrequenten Störanregung des zweiten Biegemodes bei Messung mit Sensor S1

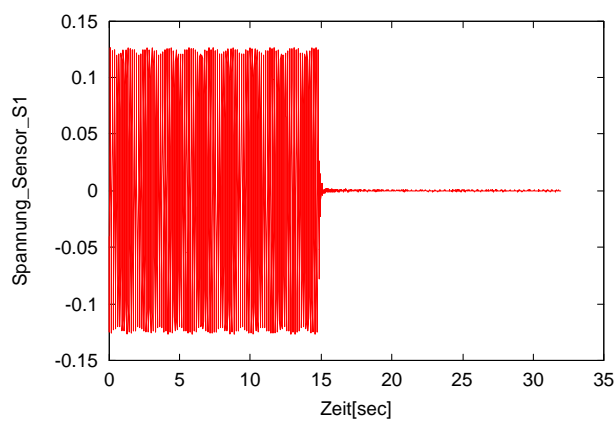


Bild 15: Kompensation einer monofrequenten Störanregung des dritten Biegemodes bei Messung mit Sensor S1

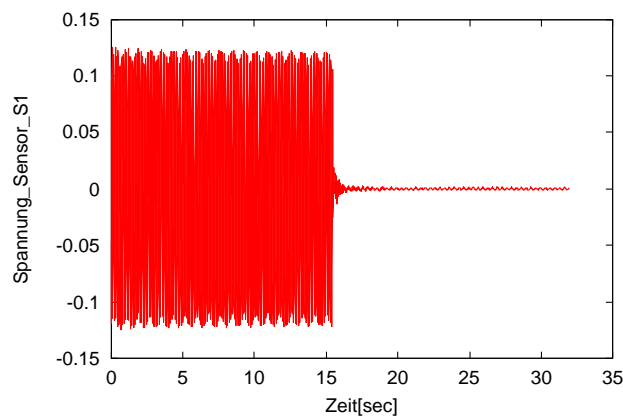


Bild 16: Kompensation einer monofrequenten Störanregung des sechsten Biegemodes bei Messung mit Sensor S1

Anzumerken wäre noch, dass sich die dargelegten Messergebnisse auf das Regelungssystem beziehen, d.h. es wurden nur die dem Regler zur Verfügung gestellten Sensorinformationen berücksichtigt.

4. Zusammenfassung

In dieser Veröffentlichung wurde das Prinzip der Schwingungskompensation des Dachblechs einer PKW-Rohkarosserie durch den Einsatz adaptronischer Komponenten dargestellt. Als Aktoren und Sensoren kamen Piezofolienmodule zum Einsatz, die Regelung basierte auf dem bekannten Leaky FXLMS-Algorithmus. Die im Betrieb des PKW durch die Motorharmonischen angeregten, störenden Biegemoden des Daches können so prinzipiell unterdrückt werden, wodurch die Schallabstrahlung des Daches verringert wird. Dies steigert den Komfort der Fahrzeuginsassen.

Literatur

- [1] Algermissen, S.; Weyer, T.: *Modellbildung eines VW Bora Daches unter Verwendung experimentell ermittelter Modaldaten*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Braunschweig, Interner Bericht 131-2002/36, 2002
- [2] Liu, Jacques, Miller: *Frequency Domain Structural System Identification by Observability Range Space Extraction*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 118, S. 211-220, 1996
- [3] Kuo, S.M.; Morgan, D.R.: *Active Noise Control Systems - Algorithms and DSP Implementations*, Wiley, 1996

Autor:

Dipl.-Ing. Tom Weyer
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Braunschweig

Co-Autor:

Dr.-Ing. Hans Peter Monner
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Braunschweig