

AUTOREN



**DIPL.-ING. (FH)  
ROMAN KRAUS**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Strukturtechnik am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) in Darmstadt.



**DR.-ING. SVEN HEROLD**

ist Abteilungsleiter Strukturtechnik und Schwingungstechnik am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) in Darmstadt.



**JONATHAN MILLITZER  
B. SC.**

ist Fachteamleiter Regelungstechnik in der Abteilung Zuverlässige Signalverarbeitung und Strukturüberwachung am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) in Darmstadt.



**DIPL.-ING.  
TIMO JUNGBLUT**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Strukturtechnik und Schwingungstechnik am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) in Darmstadt.

# ENTWICKLUNG AKTIVER MOTORLAGERUNGEN AUF BASIS VON PIEZOAKTOREN

In Fahrzeugen gelangen die vom Motor verursachten Schwingungen über die Motorlager und die Karosserie in den Fahrzeuginnenraum und können sich dort als unangenehm empfundener Schall äußern. Als mögliche Gegenmaßnahmen haben sich passive Hydrolager seit vielen Jahren bewährt. Aktuelle Entwicklungen in der Fahrzeugindustrie, wie beispielsweise der Einsatz von Dreizylindermotoren oder das selektive Abschalten von Zylindern, sorgen für Betriebszustände, für die der Einsatz passiver Systeme unzureichend sein kann. Eine vielversprechende Maßnahme, um den Schwingungskomfort und den akustischen Eindruck bei diesen Technologien gezielt zu verbessern, stellt der Einsatz aktiver Motorlager dar. Am Fraunhofer-Institut LBF wurde ein solches Lager systematisch am Versuchsstand entwickelt und anschließend in einem realen Fahrzeug getestet.



1	MOTIVATION
2	AKTIVE MASSNAHMEN VERBESSERN DEN KOMFORT
3	FUNKTIONSPRINZIP DER AKTIVEN LAGERUNG
4	EVALUIERUNG DES LAGERKONZEPTS
5	EINGESETZTE REGELUNGSTECHNIK
6	BETRIEBSMESSUNGEN AM FAHRZEUG
7	ERGEBNISSE DER BETRIEBSMESSUNGEN
8	ZUSAMMENFASSUNG

## 1 MOTIVATION

Neben einer Vielzahl weiterer Teilschallquellen wie Wind- und Rollgeräuschen dominieren in der Fahrgastzelle die vom Motor und Antriebsstrang verursachten Geräuschemissionen. Um die Anregung durch den Motor möglichst gering zu halten, wird dieser über die Motorlager weich aufgehängt und somit gegenüber der Karosserie isoliert. Die Lager erfüllen hierbei eine Reihe von Funktionen, die zum Teil widersprüchliche Eigenschaften erfordern. Einerseits müssen sie eine hohe Dämpfung im Bereich der Starrkörperresonanzen des Motors, die üblicherweise zwischen 7 Hz und 15 Hz liegen, aufweisen. Andererseits ist eine möglichst geringe Dämpfung im höheren Frequenzbereich erforderlich, um eine gute Isolationswirkung im oberen Drehzahlbereich zu gewährleisten. Aufgrund dieser Anforderungen müssen Kompromisse bezüglich der Lagereigenschaften bei niedrigen und hohen Frequenzen eingegangen werden. Unterschieden werden dabei die sogenannten trockenen Lager, die aus einem elastischen Tragkörper bestehen, der den Motor in seiner Position hält, und die Hydrolager, die gegenüber den trockenen Lagern über ein zusätzliches dämpfendes Medium verfügen. Dieses trägt insbesondere im niedrigen Frequenzbereich zu einer erhöhten Dämpfung bei. So gelingt es, den Zielkonflikt bei der Auslegung von Motorlagern zu entschärfen. Solche Hydrolager sind seit langem Stand der Technik und sorgen bei optimaler Abstimmung für einen hohen Fahrkomfort.

Politische Zielsetzungen und ein gestiegenes Umweltbewusstsein der Bevölkerung sorgen derzeit für ein Umdenken bei der Motorisierung von Fahrzeugen. Zu nennen sind hier vor allem der Trend zum Downsizing, die selektive Zylinderabschaltung und der Einsatz von Hybridantrieben zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes und des Kraftstoffverbrauchs. Diese Konzepte stellen Fahrzeugentwickler

hinsichtlich des Fahrkomforts vor neue Herausforderungen, denen mit herkömmlichen Motorlagern ohne weitere Maßnahmen kaum begegnet werden kann. Eine Möglichkeit, den hohen Anforderungen gerecht zu werden, besteht darin, adaptive beziehungsweise schaltbare Motorlager einzusetzen [1]. Diese verhalten sich ähnlich wie die bekannten Hydrolager, deren dynamische Eigenschaften können jedoch an den jeweiligen Betriebsmodus des Fahrzeuges angepasst werden. Diese Technologie ist weitestgehend ausgereift und wird bei einigen Fahrzeugtypen genutzt, um die Lagersteifigkeit an die jeweilige Motordrehzahl anzupassen.

## 2 AKTIVE MASSNAHMEN VERBESSERN DEN KOMFORT

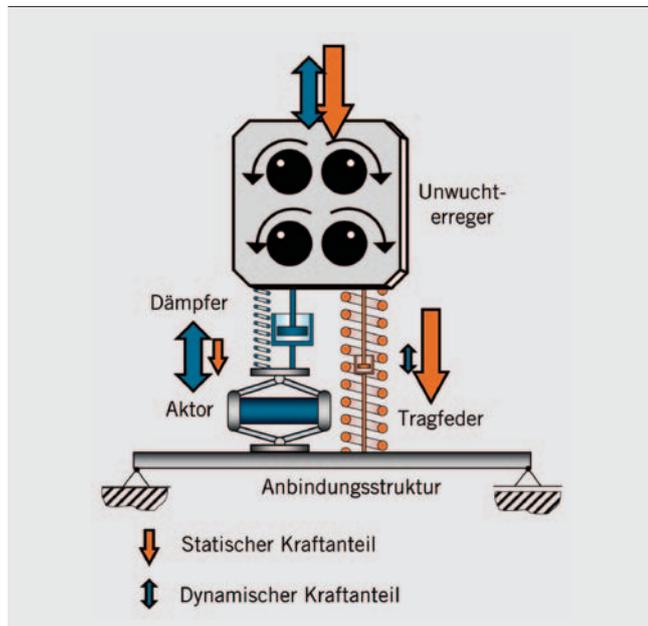
Neben adaptiven Lagern sind in den letzten Jahren verstärkt auch aktive Konzepte zur Schwingungskontrolle in den Fokus der Forschungstätigkeit gerückt. Hier werden die vom Motor in das Fahrzeug eingeleiteten störenden Vibrationen durch eine Überlagerung phasenverschobener Gegenschwingungen minimiert. Darüber hinaus besteht mit solchen aktiven Maßnahmen die Möglichkeit, das akustische Profil des Fahrzeugs durch Unterdrücken oder Hervorheben bestimmter Frequenzanteile gezielt zu gestalten. Dieses Sound-Design bietet neue Freiheiten bei der akustischen Entwicklung von Fahrzeugen und kann dabei beispielsweise auch in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl erfolgen.

Aus dem Stand der Technik sind verschiedene Technologien zur aktiven Schwingungskontrolle bekannt. Bei aktiven Tilgern und Inertialmassenaktoren stützen sich die Aktoren gegen eine zusätzliche Masse ab [2]. Diese bieten den Vorteil, dass sie weitestgehend frei am Fahrzeug positionierbar sind. Nachteilig ist ihr begrenzter Frequenzbereich. Um effektiv Gegenkräfte einleiten zu können, müssen sie oberhalb ihrer Eigenfrequenz betrieben werden, unterhalb sind sie nahezu wirkungslos. Inertialmassenaktoren bringen daher zusätzliche Masse und zusätzliche, unerwünschte Resonanzen in das System ein. Die erforderliche Masse ist dabei umso größer, je niedriger die Eigenfrequenz gewählt wird.

Bei aktiven Lagern werden die Aktoren direkt in die Schnittstelle zwischen den anregenden Aggregaten und der zu beruhigenden Struktur integriert, dadurch kann die Zusatzmasse entfallen. Sie sind insbesondere dann vorzuziehen, wenn auch bei niedrigen Frequenzen eine aktive Schwingungskontrolle stattfinden soll. Für beide genannten Schwingungsreduktionsmaßnahmen kann der Einsatz von elektrodynamischen Aktoren, wie sie beispielsweise von Lautsprechern bekannt sind, zweckmäßig sein. In [3] wird beispielsweise ein auf einer Schwingspule basierendes aktives Motorlager mit hohem Integrationsgrad vorgestellt, das seinen Weg in die Serie gefunden hat. Neben elektroaktiven Polymeren [4], die eine interessante Alternative darstellen können und noch in einem frühen Entwicklungsstadium stecken, weisen auch Piezoaktoren großes Potenzial im Bereich der Schwingungskontrolle auf [5]. Sie können große Kräfte auf sehr geringem Bauraum erzeugen und stellen deshalb eine vielversprechende Alternative zu Schwingspulen dar. Dieser Beitrag stellt ein neues Lagerungskonzept vor, das auf einem Piezoaktor mit Wegübersetzungsmechanismus basiert und erfolgreich in einem Versuchsfahrzeug getestet wurde.

## 3 FUNKTIONSPRINZIP DER AKTIVEN LAGERUNG

Die im Motorlager des Fahrzeugs wirkenden Lasten lassen sich in statische beziehungsweise quasistatische und dynamische Komponenten aufteilen. Die quasistatischen Anteile setzen sich aus



1 Schematische Darstellung der Kraftflüsse im aktiven Lager

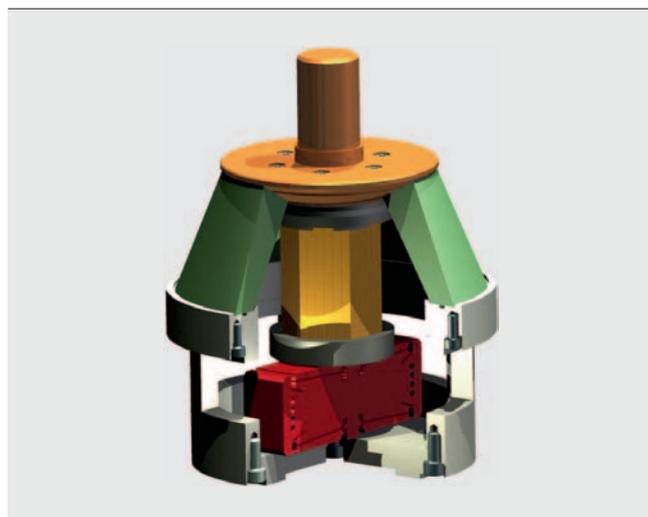
der Motormasse sowie dem An- und Abtriebsmoment zusammen. Diese Kräfte können die aus dem Verbrennungsprozess und den freien Massenkräften hervorgehenden und für den Fahrkomfort relevanten dynamischen Kräften um Größenordnungen übersteigen, verursachen jedoch keine Vibrationen im Fahrzeug. Bei bekannten Realisierungen aktiver Lager befindet sich die Aktorik häufig in einer Reihenschaltung mit einem elastischen Tragelement. Eine seriell im tragenden Kraftpfad angeordnete und somit auf die statische Belastung ausgelegte Aktorik ist zur Kompensation der dynamischen Kräfte allerdings deutlich überdimensioniert und erfordert einen unnötig hohen Leistungsbedarf. Durch eine geschickte Anordnung der Teilkomponenten, welche die Lasten in zwei getrennte Pfade aufteilt, lässt sich die Aktorik jedoch von diesen statischen Anteilen entkoppeln.

In der hier vorgestellten Lagertopologie, 1, wird diese Entkopplung durch einen viskosen Dämpfer gewährleistet, der seriell zum Aktor angeordnet ist. Die von dem Piezoaktor erzeugte dynamische Gegenkraft wird über den Dämpfer, dessen dynamische Steifigkeit mit steigender Frequenz zunimmt, in die Struktur eingeleitet. Ein Großteil der statisch wirkenden Kräfte wird über ein parallel zum Aktor positioniertes Federerelement übertragen, das den Motor in seiner Position hält. Hierdurch wird gewährleistet, dass die Aktorik weitestgehend frei von statischen und quasi-statischen Lasten gehalten wird. Bei einem Ausfall der aktiven Einheit bleibt die passive Isolationswirkung erhalten. So gelingt es, die Belastungen auf den Aktor zu minimieren und gleichzeitig die dynamischen Kräfte des Aktors wirksam auf die Karosserie zu übertragen. Da Piezoaktoren von sich aus nur sehr geringe Stellwege aufweisen, sieht das Konzept zur Erzeugung der Gegenkräfte Piezoaktoren mit Stellwegvergrößerung vor. Für die Vorversuche am Prüfstand und die prototypische Umsetzung am Fahrzeug soll sich die aktive Lösung auf die vertikale Raumrichtung beschränken, da die Anregung der Struktur in dieser Richtung dominiert. Generell lässt sich das Konzept um andere Raumrichtungen erweitern.

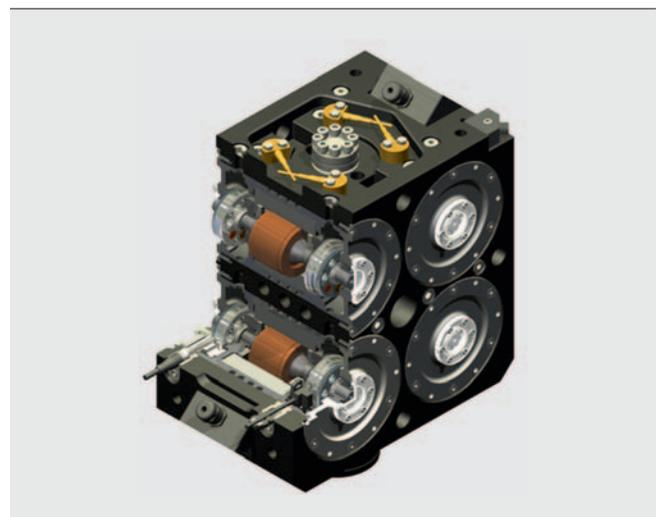
#### 4 EVALUIERUNG DES LAGERKONZEPTS

Basierend auf den Ergebnissen einer Gesamtsystemsimulation mit Matlab wurde ein prototypisches Lager aufgebaut, 2, und in einer Versuchsumgebung implementiert, in der die Ergebnisse der numerischen Simulation validiert werden konnten. Die Versuchsumgebung 1 besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten: einem Unwuchterreger, 3, der sowohl die statische Vorlast auf das Lager als auch die Anregung durch die dominierende zweite Motorordnung des Verbrennungsmotors nachbildet, einem Balken als Anbindungsstruktur, der das Verhalten der Automobilkarosserie nachbildet, und dem zwischen Unwuchterreger und Anbindungsstruktur angeordneten aktiven Lager, das den Unwuchterreger als Störquelle von der zu beruhigenden Anbindungsstruktur isolieren soll.

Beim Ottomotor kommt es bei jeder zweiten Kurbelwellenumdrehung zu einer Zündung. Kennzeichnend für den Betrieb von Vierzylindermotoren ist deshalb die Dominanz der zweiten Motorordnung, die hier vom Unwuchterreger nachgebildet wird. Die Amplitude wird



2 Schnittansicht des für den Versuchsstand aufgebauten Lagermodells



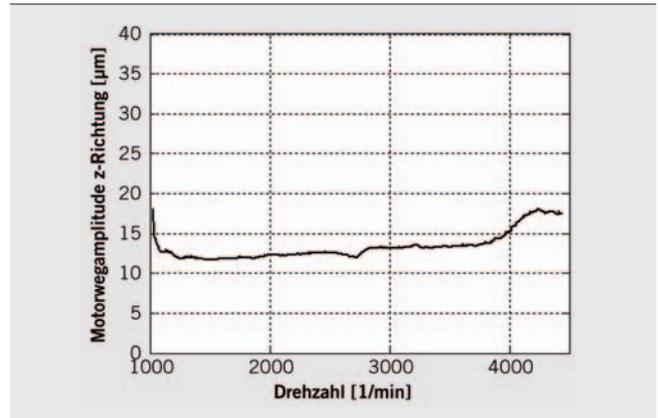
3 Schnittansicht des Unwuchterregers

so gewählt, dass sich in der Versuchsumgebung vergleichbare Schwingwege einstellen, wie sie zuvor am Versuchsfahrzeug gemessen wurden, ④.

## 5 EINGESETZTE REGELUNGSTECHNIK

Das Ansteuersignal für den integrierten Piezoaktor wird von einem adaptiven Regelalgorithmus berechnet. Bei der Reduktion oder Anpassung harmonischer Signale werden häufig Feedforward-Regler eingesetzt. Ein bekannter Regelalgorithmus ist hierbei der Filtered-Reference-Least-Mean-Squares-Algorithmus (FxLMS) in einer speziellen Topologie für harmonische Signale [6, 7]. Zur Berechnung des Ansteuersignals wird die aktuelle Drehzahl gemessen, eine Messung der Phasenlage des rotierenden Systems ist nicht erforderlich. Mithilfe eines Oszillators wird ein harmonisches synthetisches Referenzsignal berechnet, das durch ein adaptives Filter in Betrag und Phase so angepasst wird, dass eine optimale Reduktion der Zielgröße (beispielsweise dem Schalldruck) erreicht wird. Die Filterkoeffizienten werden hierbei mittels des gradientenbasierten FxLMS-Verfahrens angepasst. Der Regelalgorithmus benötigt des Weiteren die Kenntnis der Systemdynamik, die einfach mittels eines adaptiven Filters im Versuch identifiziert werden kann [8]. Der Regelalgorithmus wurde im Versuch auf einem Rapid-Control-Prototyping-System implementiert. Die Funktionsweise auf einer eingebetteten Signalverarbeitungsplattform wurde in früheren Arbeiten ebenfalls verifiziert [9].

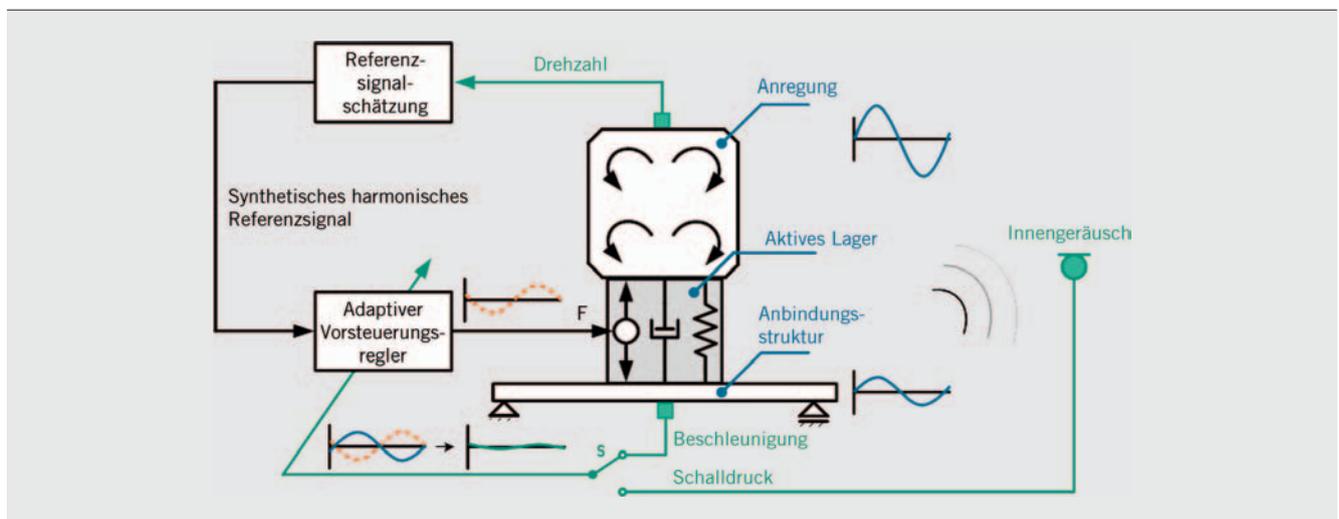
⑤ zeigt den Versuchsaufbau mit dem aktiv gelagerten Unwuchterreger und der resonanten Anbindungsstruktur sowie dem verwendeten Regelalgorithmus. Die am Unwuchterreger erzeugte Störung wird durch die passive Isolationswirkung des Lagers bereits reduziert und kann durch die Einleitung von Aktorkräften zusätzlich gemindert werden. Wahlweise dienen die Aufstandspunktbeschleunigungen oder der Schalldruck im Fahrzeug als Fehlergröße für die Adaption der Regelfilterkoeffizienten. Um auf Änderungen der Drehzahl und der Umgebungsbedingungen optimal reagieren zu können, werden die Filterkoeffizienten in jedem Zeitschritt neu berechnet. Am Versuchsstand konnte das neue Lagerkonzept erfolgreich erprobt werden, zur Darstellung der Ergebnisse wird auf [10] verwiesen.



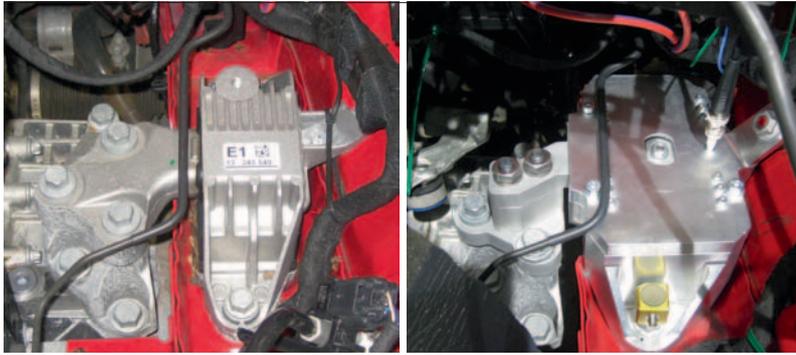
④ Gemessener Schwingweg des Motors in der zweiten Ordnung (linke Motorseite, in vertikaler Richtung)

## 6 BETRIEBSMESSUNGEN AM FAHRZEUG

Aufgrund der überzeugenden Ergebnisse am Prüfstand wurde die Lagerung konstruktiv für den Einsatz im realen Fahrzeug angepasst und für die Erprobung des aktiven Systems in ein Versuchsfahrzeug integriert. Im Gegensatz zum prototypischen Aufbau wird das Lager hierbei der realen Anregung ausgesetzt und muss an die vorliegenden Randbedingungen wie Bauraum, Temperatureinfluss und Belastungen in allen Raumrichtungen angepasst werden. Für die experimentelle Bewertung des Lagers wurde ein am Fraunhofer-Institut LBF vorhandener Gesamtfahrzeugprüfstand genutzt [11]. Das Fahrzeug wird hierbei fixiert und die Räder über zusätzliche Asynchronmotoren angetrieben beziehungsweise gebremst. Die 60 s dauernden Messhochläufe von 1500 bis auf 4500/min wurden im zweiten Gang bei einer konstanten Gaspedalstellung von 30 % durchgeführt. Je nach Zielstellung kann im Versuch die Reglerzielgröße des zuvor beschriebenen Reglers variiert werden. Hierfür kann wahlweise zwischen einer maximalen Reduktion der Aufstandspunktbeschleunigungen, des Schalldrucks im Fahrzeuginnenraum oder einer Kombination aus beidem unterschieden werden.



⑤ Blockschaltbild des adaptiven Regelkonzepts

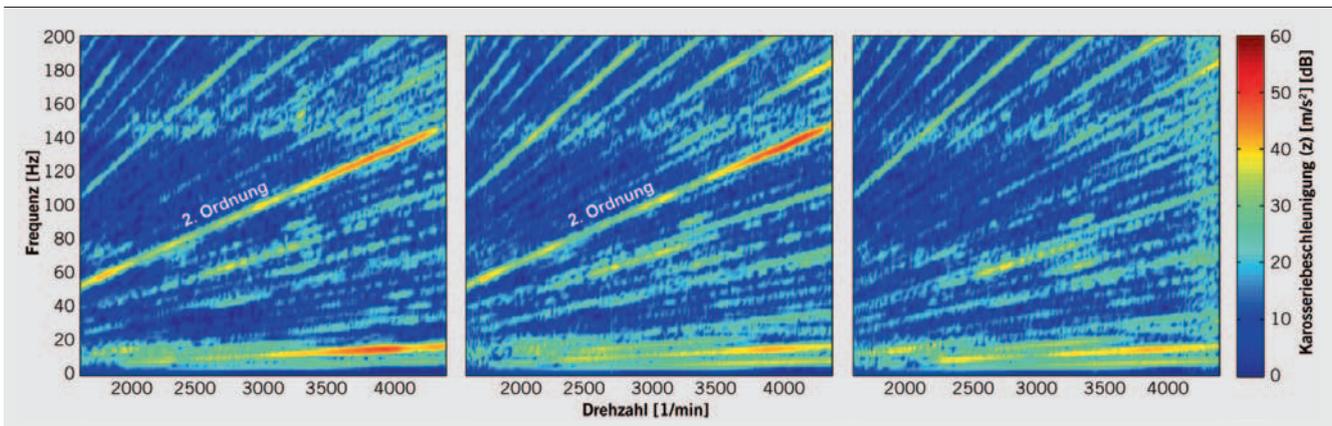


6 Serienlager (links) und aktives Lager (rechts) montiert im Fahrzeug

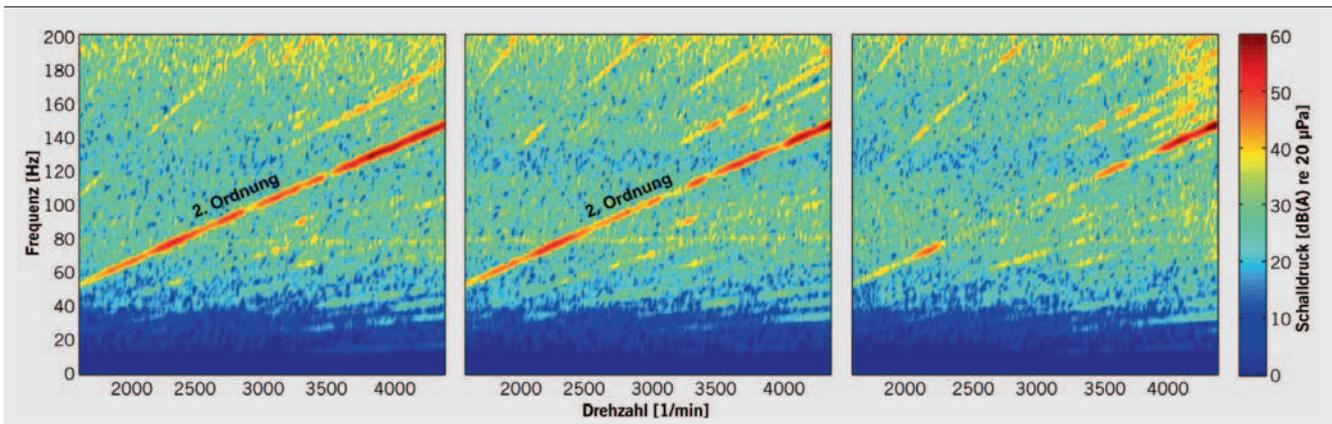
### 7 ERGEBNISSE DER BETRIEBSMESSUNGEN

Um die verschiedenen Konfigurationen vergleichen zu können, wurden die Messungen jeweils mit dem Originallager sowie dem aktiven Lager im angesteuerten und nicht angesteuerten Zustand durchgeführt. Die Beschleunigungsaufnehmer waren karosserie-seitig direkt am aktiven Lager befestigt, 6 (rechts), während der Schalldruck an der Kopfposition des Fahrers über Mikrofone im Innenraum aufgezeichnet wurde. Die Datenerfassung erfolgte mit einem LMS-Messsystem.

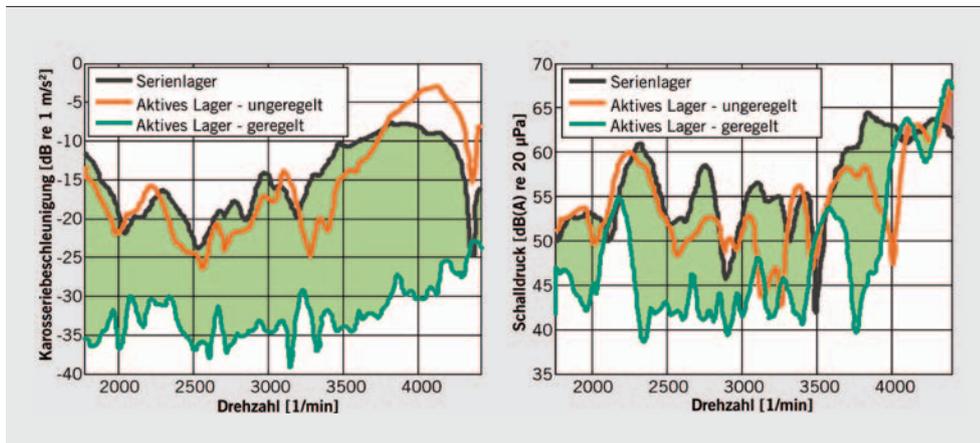
In 7 und 8 sind die Ergebnisse der Beschleunigungsmessung beziehungsweise der Schalldruckmessung eines Motorhochlaufs für alle drei Lagerkonfigurationen dargestellt. Bei der Konstruktion wurde darauf geachtet, dass die dynamische Steifigkeit des entwickelten Lagers vergleichbar mit der des Originallagers ist. Wie der Vergleich des Originallagers mit dem nicht angesteuerten aktiven Lager zeigt, weisen beide Konfigurationen eine ähnliche Charakteristik auf. Die Abweichungen der Schwingungsamplituden liegen im Bereich von -5 und 5 dB. Da die zweite Motorordnung die Anregung dominiert, wurde der Regelalgorithmus so eingestellt,



7 Spektrogramme der Karosseriebeschleunigung beim Motorlager (links: Originallager; Mitte: aktives Lager nicht angesteuert; rechts: aktives Lager angesteuert)



8 Spektrogramme des Schalldrucks in der Fahrgastzelle (links: Originallager; Mitte: aktives Lager nicht angesteuert; rechts: aktives Lager angesteuert)



9 Reduktionen der zweiten Motorordnung (links: Karosseriebeschleunigung am Motorlager; rechts Schalldruck in der Fahrgastzelle)

dass gezielt die Leistung der dominierenden zweiten Ordnung reduziert wird. Bei einem Betrieb mit aktivem Regler erreicht das System daher signifikante Beschleunigungsreduktionen entlang der zweiten Motorordnung. In den Versuchen wurde nur eines der Lager durch eine aktive Lagerung ersetzt. Da der Motor im Fahrzeug jedoch über mehrere Lager an der Karosserie fixiert ist, wird der Körperschall über eine Vielzahl an Transferpfaden in das Fahrzeuginnere übertragen, wo er als Luftschall abgestrahlt wird. Die Wirkung des Lagers hat aus diesem Grund einen größeren Einfluss auf die Beschleunigung an der Lagerposition als auf den Schalldruck im Innenraum. Dennoch werden auch bei einer Regelung auf den Schalldruck deutliche Reduktionen erreicht, die sich durch den Einsatz mehrerer aktiver Lager steigern lassen.

Um den Einfluss auf die zweite Ordnung zu veranschaulichen, sind die Amplituden der 2. Ordnung für die Beschleunigung und den Schalldruck, die sich während des Hochlaufs einstellen, in 9 dargestellt. Bezogen auf die Werte des Serienlagers zeigen die Messergebnisse des geregelten aktiven Lagers, dass die Beschleunigungswerte der zweiten Motorordnung um bis zu 20 dB reduziert werden können. Bei der Reduktion des Schalldruckpegels werden Werte von bis zu 10 dB erreicht. Der grün eingefärbte Bereich stellt die Verbesserung gegenüber dem ursprünglichen Zustand dar.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG

Aktuelle Trends im Bereich der Fahrzeugmotorisierung stellen Fahrzeugentwickler vor neue Herausforderungen hinsichtlich des Fahrkomforts. Eine vielversprechende Möglichkeit, den steigenden Anforderungen gerecht zu werden, stellt der Einsatz aktiver Motorlager dar, die den störenden Schwingungen direkt am Entstehungsort entgegen wirken. Ein solches Lager wurde am Fraunhofer-Institut LBF an einem vorhandenen Motorlagerprüfstand entwickelt, bevor es im realen Fahrzeug erprobt wurde. Die Lagerung zeichnet sich dadurch aus, dass die Aktorik von einem Großteil der statischen Lasten entkoppelt wird. Hierdurch werden die Anforderungen an die Dimensionierung des Aktors und die für die Ansteuerung erforderliche Leistungselektronik reduziert. Bei den durchgeführten Messungen am Versuchsstand und im Fahrzeug konnte die Technik ihr Potenzial unter Beweis stellen. Hier wurden karosserieseitig Beschleunigungsreduktionen von bis zu 20 dB gemessen. Die Technik ist über den Einsatz in Fahrzeugen hinaus für zahlreiche Aufgabenstellung im Bereich der aktiven Aggregatlagerung geeignet.

## LITERATURHINWEISE

- [1] Janocha, H.; Steuerbares Motorlager mit magnetorheologischer Flüssigkeit. In: VDI-Berichte (2006), Nr. 1931, S. 313
- [2] Svaricek, F.; et al.: Aktive Schwingungskompensation zur Innengeräuschminderung. 31. Jahrestagung für Akustik (DAGA 2005), München, 2005
- [3] Römling, S.; Vollmann, S.; Kolkhorst, T.: Das aktive Motorlagerungssystem im neuen Audi S8. In: MTZ 74 (2013), Nr. 1, S. 54–59
- [4] Kaal, W.; et al.: Aktive Vibrationskontrolle einer Leichtbaustruktur mit EAP-Aktorik. In: VDI Mechatronik, Aachen, 2013
- [5] Genderjahn, R.; et al.: Active Hydromount with Piezo Actuator to Enhance Comfort in Cars. 13<sup>th</sup> International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, Bremen, 2012, S. 439–442
- [6] Mayer, D.; et al.: Realisation and test of an active engine mount system for automotive applications. Proceedings of 5<sup>th</sup> International Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress, SAE, 2008
- [7] Elliot, S.: Signal Processing for Active Control. Academic Press, 2000
- [8] Widrow, B.; Stearns, S.: Adaptive Signal Processing. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1985
- [9] Kauba, M.; et al.: Multi-channel narrowband Filtered-x-Least-Mean-Square algorithm with reduced calculation complexity. 5<sup>th</sup> Eccomas Thematic Conference on Smart Structures and Materials SMART'11, Saarbrücken, 2011
- [10] Jungblut, T.; et al.: Modellbasierte Entwicklung einer aktiven elastischen Lagerung für Aggregate. In: Konstruktion (2012), Nr. 9, S. 68–74
- [11] Kraus, R.; et al.: Development and in-vehicle test of a novel active engine mount. Actuator. 13<sup>th</sup> International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, Bremen, 2012, S. 443–446

## DANKE

Die vorgestellten Arbeiten entstanden im Rahmen des Loewe-Zentrums Adria (Adaptronic – Research, Innovation, Application), das vom Land Hessen gefördert wird, und dem FP7 EU Projekt HIPER-Act (CP-IP 212394). Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung.



DOWNLOAD DES BEITRAGS

[www.springerprofessional.de/ATZ](http://www.springerprofessional.de/ATZ)



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

order your test issue now: [springervieweg-service@springer.com](mailto:springervieweg-service@springer.com)