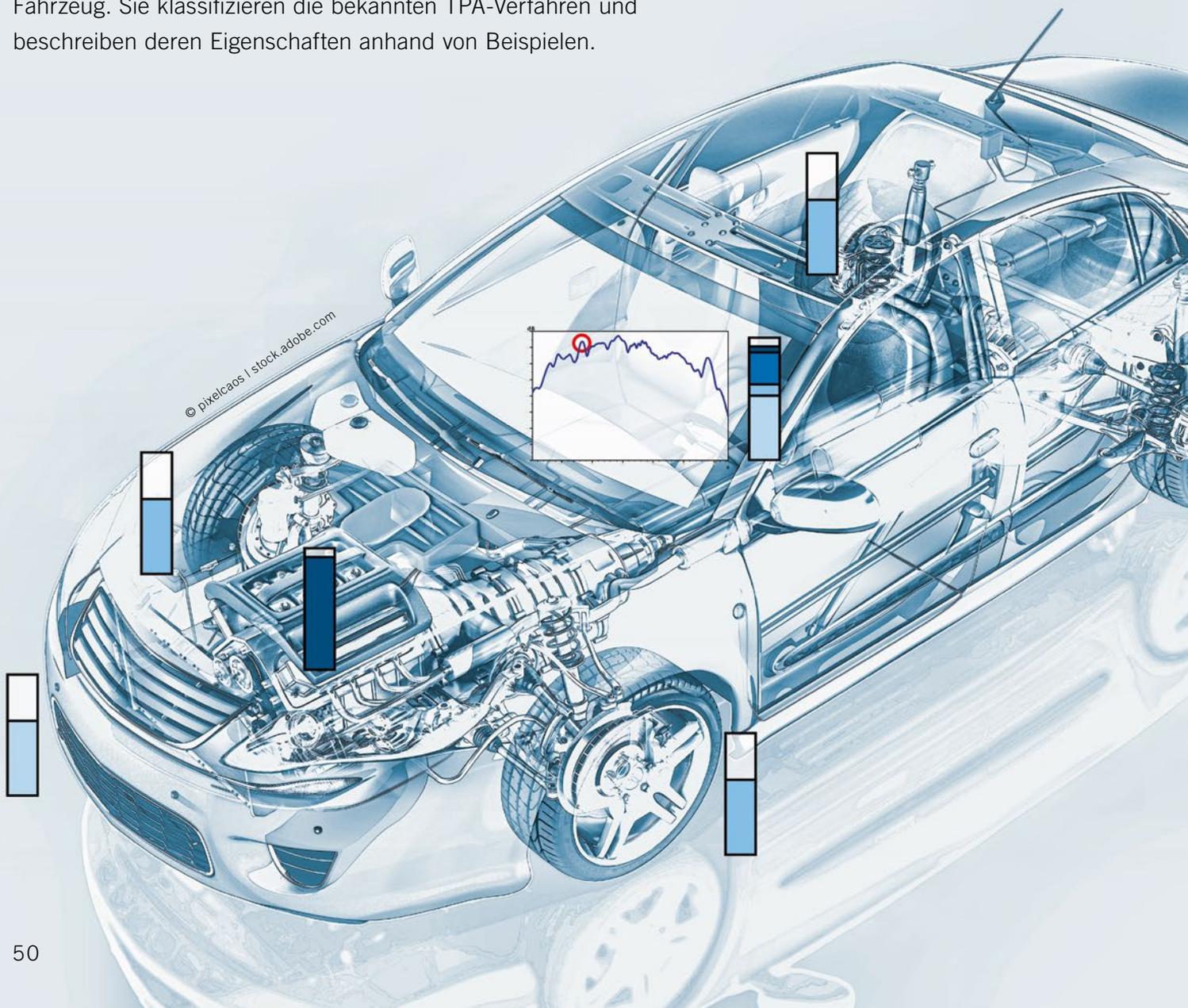


# Framework zur Transferpfadanalyse in der Fahrzeugentwicklung

Müller-BBM VibroAkustik Systeme und Vibes Technology vertiefen das Konzept der Transferpfadanalyse (TPA), also die Untersuchung des Zusammenspiels von aktiven und passiven Komponenten im Fahrzeug. Sie klassifizieren die bekannten TPA-Verfahren und beschreiben deren Eigenschaften anhand von Beispielen.



AUTOREN



**Dr.-Ing. Dejan Arsić**  
ist Key Account Manager  
bei der Müller-BBM  
VibroAkustik Systeme GmbH  
in München.



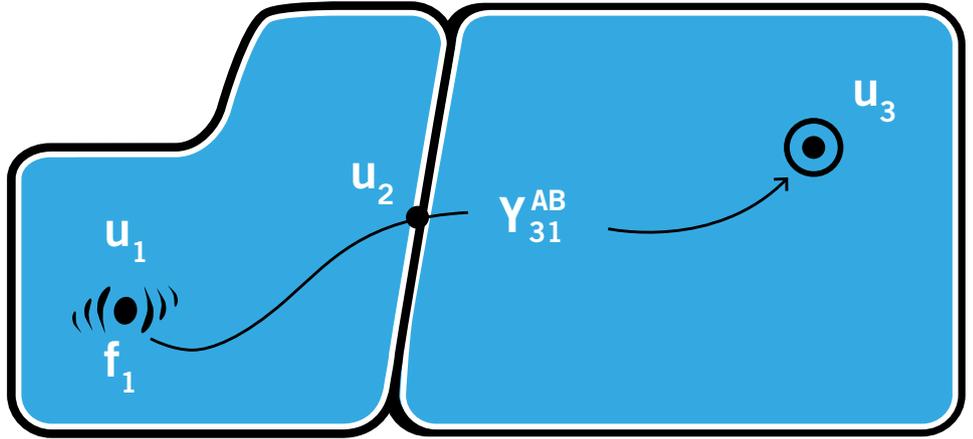
**Dipl.-Ing. (FH) Matthias Pohl**  
ist Presales Consultant  
bei der Müller-BBM  
VibroAkustik Systeme GmbH  
in München.



**Dr. Dennis de Klerk**  
ist CEO bei der Müller-BBM  
VibroAkustik Systeme B.V.,  
in Dalfsen (Niederlande).



**Dr. Maarten van der Seijs**  
ist Co-founder und CTO bei  
der Vibes Technology B.V.,  
in Delft (Niederlande).



**BILD 1** Die grundlegende Idee der TPA im Gesamtsystem schematisch dargestellt (© Vibes Technology)

**GRUNDLAGEN**

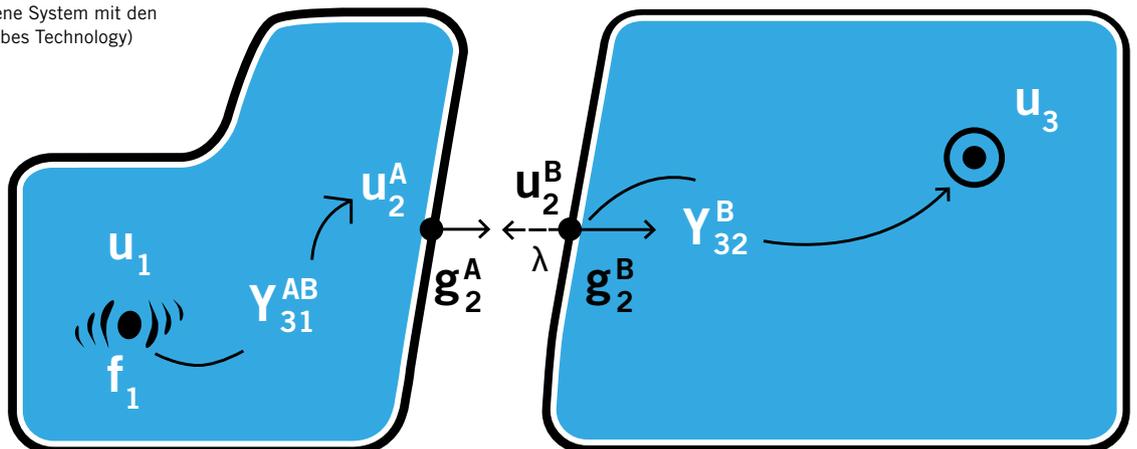
Die Transferpfadanalyse (TPA) ist in der Fahrzeugentwicklung ein elementarer Bestandteil der Strukturanalyse. Sie wird in der Entwicklung, Simulation, Absicherung und im Troubleshooting angewendet. In den letzten Jahren haben sich viele unterschiedliche TPA-Verfahren herausgebildet, deren theoretische Grundlagen inzwischen hinreichend publiziert worden sind [1]. Die Verfahren weisen teilweise ein gemeinsames Grundkonzept auf oder unterscheiden sich grundlegend. Es herrscht daher häufig eine Unsicherheit beziehungsweise Uneinigkeit über die Funktionsweise und mögliche Einsatzgebiete der einzelnen Ansätze. Obwohl alle zur Familie der Transferpfadanalyse gehören, haben sie jedoch einen teils deutlich unterschiedlichen Fokus.

**TRANSFERPFADPROBLEM**

In diesem Artikel wird das allgemeine Konzept der Transferpfadanalyse erläutert. Die bekannten TPA-Verfahren werden in drei Gruppen unterteilt und deren Eigenschaften mit Beispielen verdeutlicht.

Das Transferpfadproblem selbst lässt sich nach **BILD 1** vereinfacht darstellen: Das Gesamtsystem AB besteht aus einer aktiven Komponente A und einer passiven Komponente B, beispielsweise Motor und Karosserie. Innerhalb der aktiven Struktur wird eine Kraft  $f_1$  eingeleitet, die am Punkt  $u_2$  an die passive Struktur weitergegeben und an der Antwortposition  $u_3$  beobachtet wird. Um das Übertragungsverhalten genauer zu beschreiben, bietet es sich an, die Struktur wie in **BILD 2** freizuschneiden und die Kräfte an der Fügestelle detailliert zu beschreiben. Es wird hierbei angenommen, dass am

**BILD 2** Das freigeschnittene System mit den Fügstellenkräften (© Vibes Technology)



Indikatorpunkt  $u_2^A$  die Kraft  $g_2^A$  aus der aktiven Struktur als Kraft  $g_2^B$  in die passive Struktur eingeleitet wird. Die Gesamtstruktur wird somit von der Gegenkraft zusammengehalten. Es gibt daher effektiv drei zu bestimmende Variablen:

1. Kraftanregung
2. Fügestellenkräfte
3. Transferpfade beziehungsweise Beiträge.

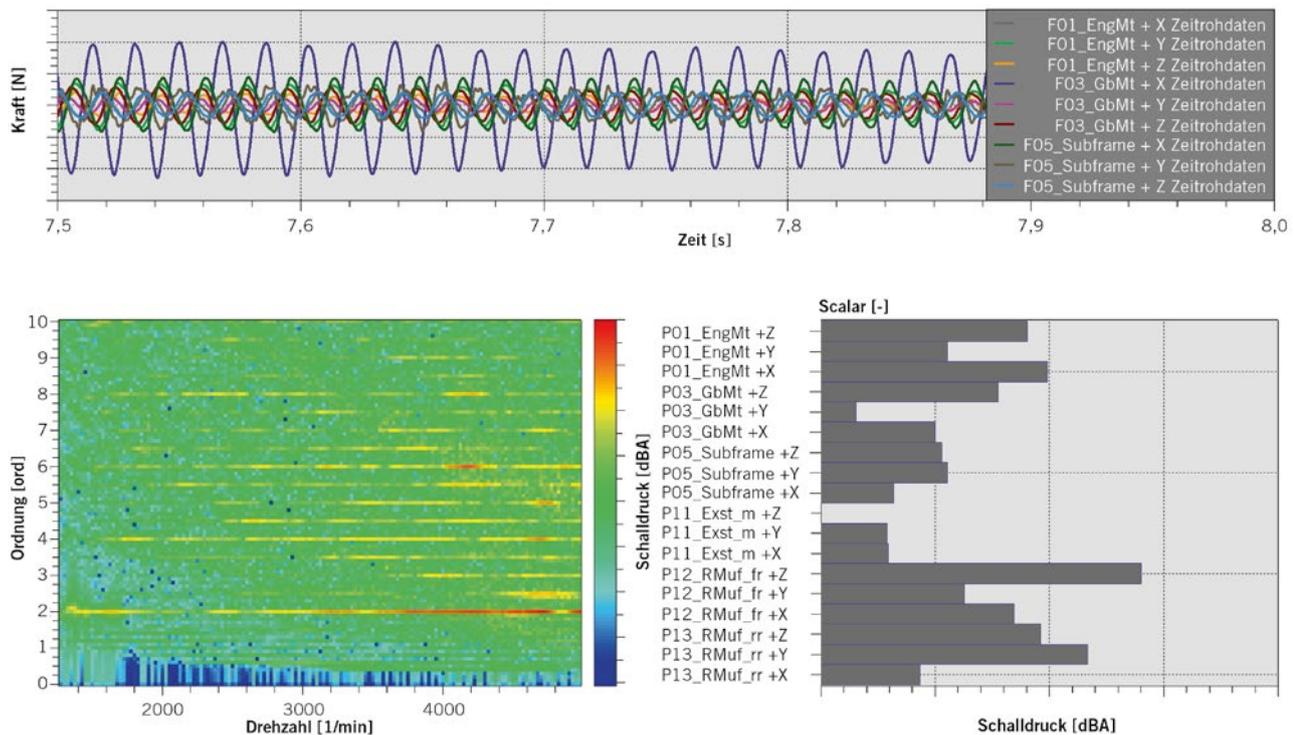
Die klassische TPA hat das Ziel, das Gesamtsystem physikalisch umfassend, das heißt Fügestellenkräfte und Transferpfade, zu beschreiben. Die traditionellen Methoden fokussieren hierbei besonders auf die exakte Bestimmung der Fügestellenkräfte [1]. Mit der Direct Force-Methode werden die Kräfte direkt gemessen, wobei ein Zerlegen der Struktur und ein Anbringen von Kraftmessdosens an den betreffenden Stellen erforderlich ist. Dies ist einerseits sehr zeitaufwendig und andererseits oftmals nicht möglich, ohne die Struktur grundlegend zu verändern. Um dies zu vermeiden, kann man Lagerpunkte auch als Massefedersystem betrachten und mit den bekannten Eigenschaften, hier Dämpfung und Steifigkeit, eines Lagers, auf die Fügestellenkräfte schließen. Allerdings gestaltet sich dies nicht einfach.

Um diese Unzulänglichkeiten zu umgehen, wird ein zweistufiges Verfahren, deren Kernstück die sogenannte Matrixinversion darstellt, verwendet.

**MATRIXINVERSION**

Die Matrixinversion wird meist in einem frühen Entwicklungsstadium zur Absicherung des Entwicklungsprozesses eingesetzt. Als Beispiel können Komfortmessungen aus dem Fahrwerksbereich genannt werden. Es soll sichergestellt werden, dass keine Störgeräusche beziehungsweise unerwünschte Vibrationen in der Fahrgastzelle wahrgenommen werden. Zunächst werden Betriebsmessungen mit verschiedenen Lastzuständen durchgeführt, um ein möglichst breites Spektrum an Anregungen abzudecken. Die Sensorpositionen werden mit Bedacht gewählt. Während mögliche Antwortpositionen recht offensichtlich sind, gestaltet sich die Platzierung von quellenahen Beobachtungspunkten als schwierig: Es werden daher Beschleunigungsaufnehmer und Mikrofone rund um die Quelle beziehungsweise Koppelstelle angebracht. Somit kann sowohl der Körper- als auch Luftschalleintrag bestimmt werden. Als Indikatoren werden Messpunkte passivseitig an Motorla-

gern, Getriebelagern, Abgasanlage und Schalldämpfern gewählt und Betriebsmessungen auf der Rolle oder auf der Straße durchgeführt. Anschließend werden die aktiven Komponenten wie Motor, Getriebe und Abgasanlage entfernt und mit gezieltem Krafteintrag die FRFs der passiven Struktur bestimmt. Das erfolgt durch eine Hammer- oder Shakermessung. Die so bestimmten Übertragungsfunktionen zwischen Antwort- und Anregeposition können nun als Matrix dargestellt und eindeutig beschrieben werden. Bildet man die Inverse dieser Matrix, lässt sich anhand der Beobachtung auf den Krafteintrag schließen. Um einen aussagekräftigen Zusammenhang zwischen Krafteinleitung und Antwortsignal zu erreichen, werden nur Übertragungsfunktionen mit ausreichend Energie beziehungsweise hoher multipler Kohärenz im betrachteten Frequenzbereich ausgewählt. Die Betriebsmessungen können nun mit den invertierten Transferfunktionen beaufschlagt werden. Man erhält so eine Beschreibung des Systems, **BILD 3**. Neben den Betriebskräften an den Indikatorpunkten können zusätzlich die Beiträge zum wahrgenommenen Schall genauer untersucht werden. Im vorliegenden Fall scheint



**BILD 3** Komfortuntersuchung am Gesamtfahrzeug mit Kräften und Beiträgen als Ergebnis (© Müller-BBM VibroAkustik Systeme)

## International, Digital, Interactive: The new eMagazine from ATZ

ATZworldwide – loaded with the newest findings in research and development of automotive engines



Test now for 30 days free of charge:  
[www.atz-worldwide.com](http://www.atz-worldwide.com)

### ATZ eMagazine has 80 pages packed with information:

- ▶ company news and the latest products
- ▶ specialist articles from industry and research
- ▶ guest comment
- ▶ interview on the cover story



**Keyword search:** The search function enables you search for a keyword in the complete issue in a matter of seconds



**PDF downloads:** The classic function for saving and downloading articles



**Didactically prepared:** Animations and editorial videos offer genuine added value and complement the specialist articles from the automotive industry



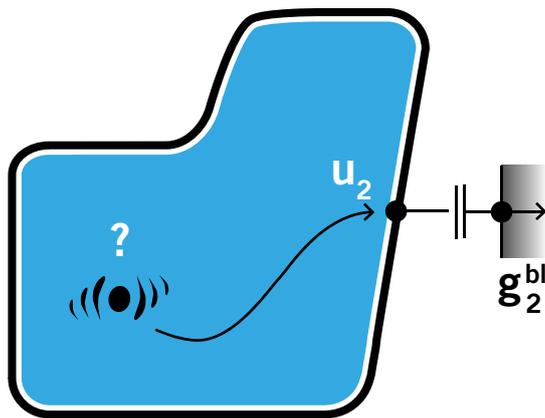
**Interactive contents:** Jump immediately to your selected article with one click



**Responsive HTML5 implementation:** This ensures that you have access to your eMagazine not only from desktops and laptops but also from smartphones and tablets



**User-friendly and direct without an app:** HTML5 technology provides a direct link to the website, ensuring access without an app store



**BILD 4** Bestimmung der Blocked Forces an speziellen Prüfständen  
(© Vibes Technology)

am Fahrerohr bei der zweiten Motorordnung insbesondere die Abgasanlage einen hohen Beitrag zu leisten.

**KOMPONENTENORIENTIERTE TPA**

Mit diesem ganzheitlichen Ansatz werden nun alle Fügstellenkräfte eines Verbunds von aktiven und passiven Komponenten exakt beschrieben. Es kann ein Abgleich mit den Ergebnissen der numerischen Simulation erfolgen. Dabei stellt sich die Frage, welche Kräfte eine einzelne isolierte, aktive Komponente in ein System einbringt. Die klassische TPA betrachtet immer das gesamte System. Der Einfluss von Modifikationen einzelner Subsysteme, wie beispielsweise ein erneuertes Lenkgetriebe, kann nicht vorhergesagt werden. Daher muss bei jeder Änderung das gesamte System von neuem vermessen werden. Fügstellen-

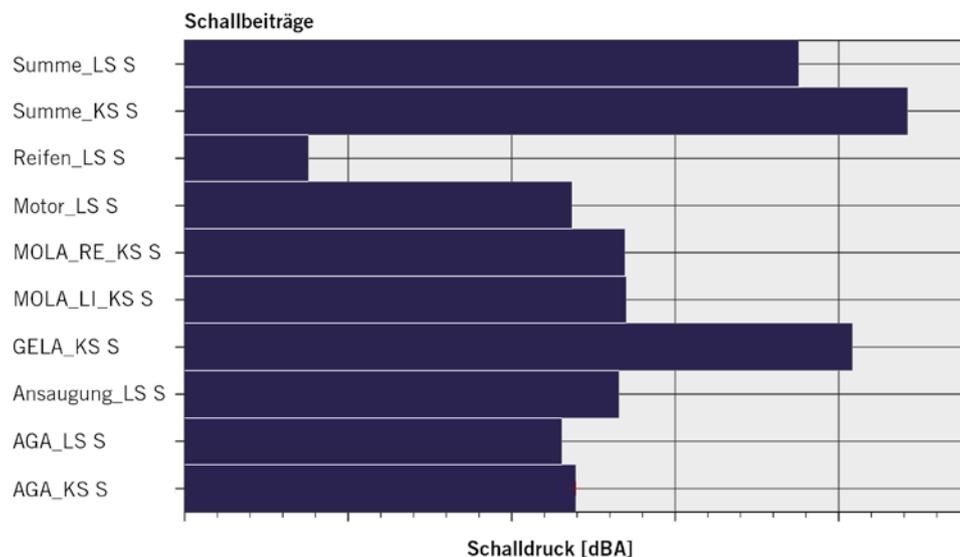
kräfte, die in einem System AB bestimmt wurden, können nicht auf ein System CB mit derselben Antwortseite übertragen werden. Die komponentenbasierte TPA beschreibt die Anregung mit sogenannten Equivalent Forces beziehungsweise Blocked Forces. Diese sind eine elementare Eigenschaft der aktiven Struktur. Durch die Beaufschlagung der Kräfte mit den FRFs eines zusammengesetzten Systems können die Kräfte auf der passiven Seite simuliert werden.

Die Blocked Forces, **BILD 4**, lassen sich direkt bestimmen, indem die aktive Komponente in einem festen Prüfstand eingespannt wird und die Kräfte direkt gemessen werden. Deutlich praktischer erscheint jedoch die sogenannte In-Situ-Methode, die der zuvor beschriebenen Matrixinversion ähnelt [2]. Bezieht man die Übertragungsfunktionen des Gesamtfahrzeugs

zur Bestimmung der Kräfte ein, können nun anstatt der Fügstellenkräfte die Blocked Forces bestimmt werden. Da sie eindeutige Eigenschaften der Quelle A sind, können sie zur Simulation von Schwingungen in jeglichen komplexen Strukturen verwendet werden. So ist es möglich, eine Testumgebung zu erschaffen, in der Betriebsmessungen an den aktiven Komponenten durchgeführt und zeitgleich die Blocked Forces zur Simulation unterschiedlicher Fahrzeugdesigns verwendet werden können.

**OPERATIONELLE TPA**

Ein späterer Zeitpunkt im Entwicklungszyklus verlangt nach alternativen, weniger aufwendigen Methoden, um die einzelnen Quellbeiträge und deren Pfade zum Empfangspunkt zu beschreiben. In vielen Fällen soll der Ursprung eines Störgeräuschs oder einer lästigen Vibration analysiert und abgestellt werden. So kann das im Fahrzeuginnenraum als störend empfundene hochfrequente Kettenheulen eines Verbrennungsmotors, das mit der Zahnordnung der Steuerkettenritzel korrespondiert, untersucht werden. Die Quelle, also der Steuertrieb des Motors, ist in einem Entwicklungsstadium, welches keine Änderungen mehr zulässt, sodass ein Optimierungspotenzial ausschließlich im Übertragungsverhalten zu finden ist. Es geht hier vorrangig darum, möglichst schnell eine Problemlösung zu finden. Hier kommt die Operationelle TPA (OTPA) zum Einsatz. Da die Betriebskräfte an den Koppelstel-



**BILD 5** Luftschall- und Körperschallbeiträge bei der Untersuchung des Kettentriebs (© Müller-BBM Vibro-Akustik Systeme)

len für die Berechnung der Übertragungsfunktionen beziehungsweise Beiträge, bezogen auf die Antwortposition und deren Ranking, nicht benötigt werden, kann auf das aufwendige Zerlegen und Klopfen des Fahrzeugs verzichtet werden. Dies kann bei den immer anspruchsvoller werdenden Prozessen in der Automobilentwicklung den entscheidenden Hinweis für eine erfolgreiche Änderungsmaßnahme geben.

### BEISPIEL KETTENHEULEN

Das Kettenheulen kann nun in einem dreistufigen Prozess genauer quantifiziert werden. Zunächst werden auf einem Akustikrollenprüfstand Betriebsdaten mit möglichst verschiedenen Anregungen erhoben. Das Fahrzeug wird mit unterschiedlichen Temperaturen, Drehzahlen und Lastzuständen vermessen. Dabei sollten die Indikatoren passivseitig nahe der Koppelstellen des aktiven Subsystems angeordnet sein. An den Energieeinleitungspunkten in das Chassis werden karosserie-seitig Beschleunigungsaufnehmer zur Bestimmung der einzelnen Körperschallbeiträge (KS) appliziert. Mikrofone, um die aktiven Komponenten wie beispielsweise Abgas-mündung, Ansaugmündung, Reifen und Motor angeordnet, erfassen die Luftschallabstrahlung (LS). Es gilt, die relevanten Pfade oder Quellbeiträge für Betriebsmessungen mit ausgeprägter Störsignatur zu identifizieren und die Übertragung zu reduzieren.

Aus diesen operativen Messungen werden in der sogenannten CrossTalk Cancellation (CTC) Übertragungsfunktionen der quellnahen Indikatoren zum Empfänger bestimmt. Mittels Eigenwertzerlegung werden linear voneinander unabhängige Eigenvektoren berechnet, die das Übertragungsverhalten möglichst umfassend beschreiben [3]. Aufgrund dieser Übertragungsfunktionen werden nun in der TPA-Synthese komplexe FIR-Filter erstellt, mit denen die jeweiligen zu untersuchenden Anregungszeitdaten gefaltet werden, um die einzelnen Quellbeiträge im Zeitbereich zu erhalten. Diese Einzelbeiträge an den Knotenpunkten kann man für die jeweiligen aktiven Baugruppen, über den Luft- und Körperschallbeitrag bis hin zum kompletten synthetischen Beitrag am Beobachtungspunkt zusammenfassen. Das anschließende Abhören und weitere

Analysieren der Ergebnisse lässt einen tiefen Einblick in die Wirkzusammenhänge des Systems zu. In diesem Beispiel, dargestellt in **BILD 5**, hat der Pfad vom Motor über das Getriebelager hin zum Fahrerohr den höchsten Schallbeitrag. Das Ergebnis überrascht ein wenig, könnte man doch erfahrungsgemäß für diese hochfrequente Anregung eine hohe Luftschallübertragung annehmen. Mit dieser durch die OTPA geordnete Sicht können anschließend gezielt Geräuschänderungsmaßnahmen erarbeitet werden.

### FAZIT

Unterschiedliche TPA-Methoden sind in unterschiedlichen Phasen der Fahrzeugentwicklung mit verschiedenen Zielsetzungen einsetzbar. Einerseits rechtfertigt der Anspruch an die Absicherung des Gesamtfahrzeugs und die Beschreibung einzelner Komponenten, die beide eine physikalisch umfassende Beschreibung erfordern, den teils erheblichen Aufwand der Matrixinversion und der Blocked Forces. Andererseits dient die OTPA als Troubleshooting-Werkzeug zur schnellen Beurteilung von Schallbeiträgen.

### LITERATURHINWEISE

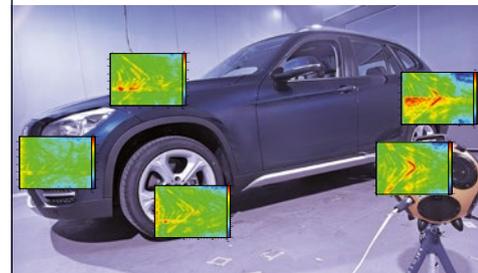
- [1] Seijs, M. V. van der; de Klerk, D.; Rixen, D. J.: General framework for transfer path analysis: History, theory and classification of techniques. In: Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 68–69, February 2016, S. 217-244
- [2] Wernsen, M. W. F.; van der Seijs, M. V.; de Klerk, D.: An indicator sensor criterion for in-situ characterisation of source vibrations. 35<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference (IMAC XXXV), Los Angeles, USA, Januar 2017
- [3] Scheuren, J.; Lohrmann, M.: Transfer Path Analysis - Experiences, Expectations and Perspectives. SAE Technical Paper, 2014-36-0803, 2014



DIESER BEITRAG IST IM E-MAGAZIN  
VERFÜGBAR UNTER:  
[www.emag.springerprofessional.de/atx](http://www.emag.springerprofessional.de/atx)

# SOUND QUALITY

– MADE BY PAK



PAK OTPA – das schnelle  
und effiziente Werkzeug zur  
Entwicklung der akustischen  
Qualität von Fahrzeugen.

