

Ein Framework zur Transferpfadanalyse in der Fahrzeugakustik

Dejan Arsic¹, Dennis de Klerk²

¹ Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH, 82152 Planegg, E-Mail: DArsic@MuellerBBM-VAS.de

² Müller-BBM Vibroakustik Systeme B.V., 8011XA Zwolle, NL, E-Mail: DdeKlerk@MuellerBBM-VAS.nl

Abstract

Die Transferpfadanalyse ist heute ein fester Bestandteil der versuchsgestützten Untersuchung von Übertragungspfaden sowohl von Luft- als auch Körperschall in Fahrzeugen. Seit der Einführung der Netzwerkanalogie in Maschinenwesen, wurden mannigfaltige Ansätze zur TPA entwickelt und haben den Sprung von der Forschung in industrielle Anwendungen gefunden. Es existieren somit viele Möglichkeiten, die möglichen Übertragungspfade in komplexen Strukturen besser zu verstehen. Inwiefern sich diese tatsächlich unterscheiden, welche genauen Ansätze dahinter stecken und welche genauen Eigenschaften diese tatsächlich haben, bei den meisten Systemen auf den ersten Blick nicht zu erkennen. Daher soll an dieser Stelle ein Überblick über unterschiedliche TPA Methoden gegeben werden, wobei eine Unterteilung in drei Felder erfolgt: die klassische TPA, die komponentenbasierte TPA und die operationelle TPA. Hierbei sollen aktuelle Herausforderungen und praktische Aspekte herausgearbeitet werden.

Einleitung

Die Transferpfadanalyse ist ein bewährter Ansatz zur Untersuchung von Strukturen und zur Lokalisierung von Schalldruck- bzw. Körperschall-Phänomenen [1]. Die Grundannahme ist hierbei, dass eine aktive Komponente eine passive Komponente, mit der diese verbunden ist, anregt. Häufig wird die TPA bei Fragestellungen eingesetzt, bei denen die Quelle der Anregung, z. B. der Motor in einem Fahrzeug, zu komplex zum Modellieren ist oder es kaum möglich ist, die Kräfte zwischen den Komponenten direkt zu messen. Daher erscheint es sinnvoll, die Struktur über die Anregung an der Quellposition und die Kräfte an den Fügstellen zu beschreiben. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, wurden in der Vergangenheit bereits unterschiedlichste Ansätze unter dem Schlagwort „TPA“ entwickelt. Es ist jedoch äußerst schwierig, die einzelnen Ansätze zu beurteilen, da sich die meisten Implementierungen nach außen hin als „Black Box“ darstellen. Die genaue Funktionsweise der einzelnen Methoden und deren mögliche Einsatzgebiete sind häufig nicht klar ersichtlich.

In dieser Arbeit werden einige der bekanntesten Verfahren untersucht. Diese unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer Ansätze, sondern auch bezüglich ihrer möglichen Anwendungsgebiete.

Der Workflow stellt sich meist wie folgt dar: a) Betriebsmessungen an der aktiven Komponente, b) Bestimmung der Eigenschaften der passiven Seite des Systems (meist die FRF mittels Hammer- bzw. Shakermessung), c) Bestimmung der Kräfte an den Fügstellen, d) Berechnung der Beiträge der einzelnen Transferpfade.

Generell lassen sich die betrachteten Methoden in folgende drei Klassen unterteilen:

- Klassische Transferpfadanalyse
- Komponentenbasierte Transferpfadanalyse
- TPA basierend auf dem Übertragungsverhalten.

Diese Ansätze existieren in weiteren Ausprägungen, die im Folgenden betrachtet werden. Zu beachten ist hierbei, dass die oben genannten Schritte nicht zwingend in der genannten Reihenfolge oder grundsätzlich durchgeführt werden müssen und dass jede der Methoden für unterschiedliche Problemstellungen geeignet ist.

Prinzipiell können alle Ansätze im Entwicklungsprozess eines Fahrzeuges eingesetzt werden. Allerdings ist hier zu unterscheiden, in welcher Phase sich die Entwicklung gerade befindet. In einer frühen Phase geht es insbesondere um die Themen Absicherung und Simulation. Hier wird meist besonderer Wert auf eine möglichst genaue Betrachtung des Gesamtsystems und der einzelnen Komponenten gelegt. Somit müssen die Kräfte zwischen den Bauteilen möglichst genau untersucht werden. Im Gegensatz dazu stehen sowohl der Produktionsanlauf und die Qualitätssicherung während der Produktion. Hier müssen möglichst schnell Lösungen für Probleme gefunden werden. Eine exakte physikalische Beschreibung des Gesamtsystems ist dabei nicht zwingend erforderlich. Nicht alle Verfahren sind in jeder Phase des Entwicklungsprozesses sinnvoll. Daher wird an dieser Stelle auch eine Einordnung der einzelnen Ansätze in den Gesamtprozess gegeben.

Das Transferpfadkonzept

Wie in Abbildung 1 dargestellt, lässt sich das Transferpfadproblem recht einfach veranschaulichen. Das Gesamtsystem AB besteht aus einer aktiven Komponente A und der passiven Komponente B. Hierbei erfolgt eine Anregung an Knoten 1, und es wird eine Antwort an Knoten 3 erwartet. Knoten 2 stellt die Fügstelle dar. Das Problem kann somit dreigeteilt werden:

- Quelle
- Interface (Fügstelle)
- Antwortposition

Wird das System im Verbund untersucht, ist insbesondere der Zusammenhang zwischen der Anregung f_1 und der Antwort u_3 von Interesse

$$u_3 = Y_{31}^{AB} f_1 \quad (1),$$

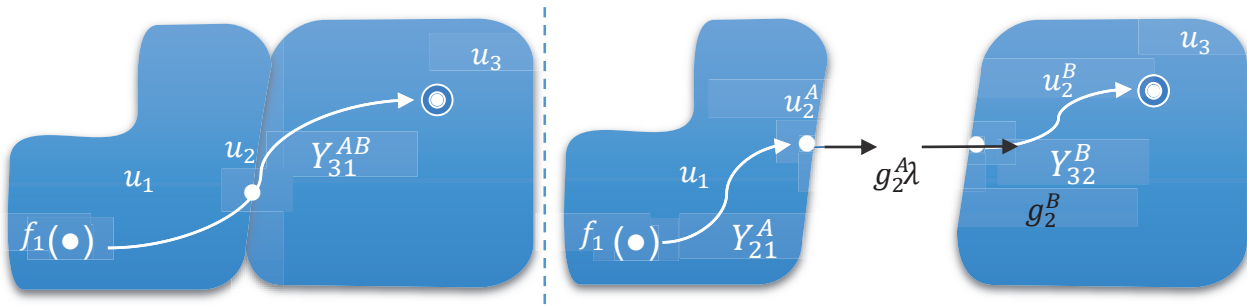


Abbildung 1: Das Transferpfadkonzept – links als Gesamtsystem und rechts als unabhängige Subsysteme A und B

wobei Y_{31}^{AB} die Matrix der FRFs darstellt. Wird der Verbund der Subsysteme aufgelöst, wie in Abbildung 1 rechts dargestellt, wird die Matrix aus den individuellen FRFs der Subsysteme wie folgt zusammengesetzt:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2^A \\ u_2^B \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}^A & Y_{12}^A & 0 & 0 \\ Y_{21}^A & Y_{22}^A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{22}^B & Y_{23}^B \\ 0 & 0 & Y_{32}^B & Y_{33}^B \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} f_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ g_2^A \\ g_2^B \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (2),$$

wobei g_i^j die Kräfte an den Fügstellen darstellen und g_i^j die Beobachtungen an den Einzelkomponenten bzw. den Fügstellen in Form einer Schwingung repräsentieren.

Die klassische Transferpfadanalyse

Die klassische Transferpfadanalyse hat die Zielsetzung, ein Gesamtsystem möglichst genau zu beschreiben und insbesondere die Kräfte zwischen den Einzelkomponenten zu betrachten [2]. Bei dieser Methode werden zunächst Betriebsmessungen durchgeführt, um die Kräfte zwischen der aktiven und passiven Seite zu bestimmen. Die FRFs der Einzelkomponenten werden anschließend mittels einer Hammer- bzw. Shakermessung bestimmt.

Wie in Abbildung 2 dargestellt, gibt es hierbei drei populäre Ansätze. Der offensichtlichste Ansatz ist die direkte Bestimmung der Kräfte (Direct Force) an den Fügstellen, wie links dargestellt. Hierzu werden die Kraftmessdosen zwischen den Komponenten angebracht und die einzelnen Kräfte bestimmt. Unter der Annahme, dass die Kräfte am Interface gleich sind und die Steifigkeit des Sensors das Gesamtsystem nicht beeinflusst, kann dann das System wie folgt beschrieben werden:

$$\lambda = -(Y_{22}^A + Y_{22}^B)^{-1} Y_{21}^A f_1 \Rightarrow g_2^B = -\lambda \quad (3),$$

wobei λ die Kraft, die die Komponenten zusammenhält, darstellt. Ein Nachteil dieser Methode ist allerdings, dass sowohl die aktive als auch die passive Komponente voneinander getrennt werden und ein Sensor dazwischen platziert werden muss. Dies ist aufgrund von Platzproblemen,

der Veränderung der ursprünglichen Verbindung und der Schwierigkeit, alle benötigten Freiheitsgrade zu bestimmen, äußerst unpraktisch.

Häufig werden zwischen den einzelnen Bauteilen ohnehin Lager mit fein abgestimmten Steifigkeiten bzw. Absorptionscharakteristiken verwendet, um Schwingungen zu dämpfen bzw. zu vermeiden. Vereinfacht kann dieser Verbund, wie in Abbildung 2 in der Mitte dargestellt, als Feder-Masse-System betrachtet werden. Anstelle der Kräfte kann nun die dynamische Steifigkeit z_{ij}^{mt} der Lager berücksichtigt werden. Man erhält die folgende Beschreibung des Gesamtsystems:

$$g_2^B = Z^{mt}(u_2^A - u_2^B) \quad (4).$$

Obwohl dieser auf Lagersteifigkeiten basierende Ansatz deutlich einfacher durchzuführen ist, hängen die Ergebnisse von der exakten Beschreibung der Lagersteifigkeit ab, die in der Realität jedoch eine nichtlineare, frequenzabhängige Charakteristik aufweist.

Den wohl populärsten klassischen Ansatz stellt die Matrix-Inversion dar. Wie in Abbildung 2 rechts dargestellt, wird hier erneut das Gesamtsystem betrachtet. Es wird angenommen, dass auf die Kräfte zwischen den Bauteilen anhand von ausgewählten Positionen rund um die Fügstelle, sogenannten „Indicator Responses“, zurückgerechnet werden kann. Hierfür werden deutlich mehr Beobachtungen als zu bestimmende Kräfte benötigt, so dass auf diese geschlossen werden kann. Es müssen zwei Messungen durchgeführt werden. Die Antwortpositionen u_i werden zunächst im Verbund mittels einer Betriebsmessung bestimmt. Im Anschluss werden die Impulsantworten der passiven Seite mit einer Hammermessung oder einer Shakermessung ermittelt. Aktive und passive Komponenten sind hierfür voneinander zu trennen. Es wird nur der passive Anteil betrachtet. Werden nun beide Messungen zusammengeführt, lassen sich die Kräfte wie folgt bestimmen:

$$g_2^B = (Y_{42}^B)^+ u_4 \quad (5).$$

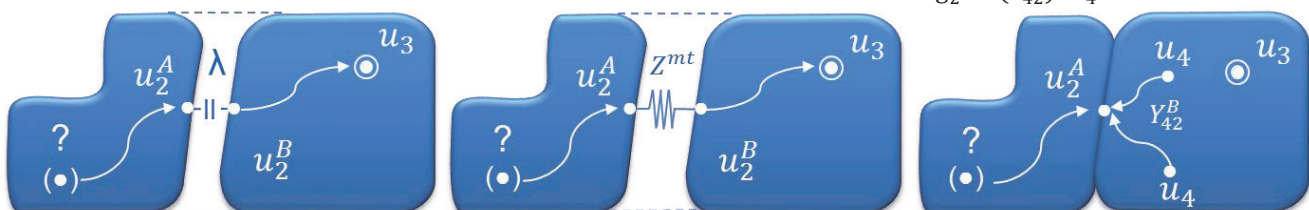


Abbildung 2: Die klassische TPA im Überblick. „Direct Force“ als genereller Ansatz zur direkten Messung der Kräfte. In der Mitte wird das Verfahren basierend auf Lagersteifigkeiten gezeigt, gefolgt von der populären Matrix-Inversion

Allen klassischen Ansätze ist gemeinsam, dass sie eine umfassende physikalische Beschreibung der gesamten Struktur als Ziel haben. Meist sind dafür mehrere, durchaus (zeit-)aufwändige Messungen notwendig. Einerseits müssen die Komponenten von einander getrennt werden, also z. B. der Motor aus dem Fahrzeug ausgebaut werden. Andererseits erfordert die Bestimmung der FRFs eine Betrachtung vieler Punkte, um eine umfassende Analyse gewährleisten zu können. Daher werden die Methoden für gewöhnlich zu Beginn des Entwicklungsprozesses angewendet. Hier ist noch entsprechend Zeit vorhanden und die Entwicklungsabsicherung hat höchste Priorität.

Die komponentenbasierte Transferpfadanalyse

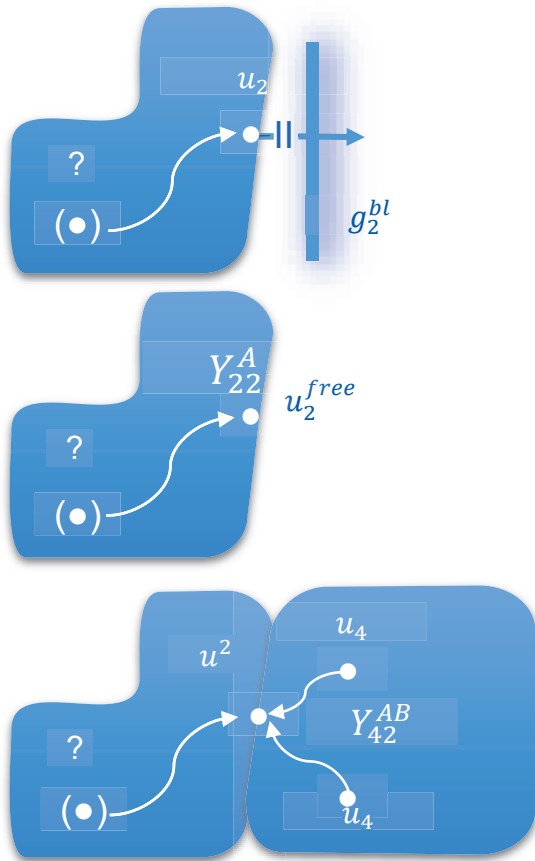


Abbildung 3: Die komponentenbasierte Transferpfadanalyse. Von oben nach unten: blocked force, free force und in situ

Die bisher vorgestellten Ansätze betrachten den Verbund aus passiver und aktiver Komponente. Es werden keine Rückschlüsse darauf geliefert, wie sich die aktive Seite unabhängig vom Einfluss angrenzender Komponenten verhält und welche Kräfte von der aktiven Seite ausgehen. Diese Informationen sind jedoch beispielsweise für die Simulation im Entwicklungsprozess essentiell. So können Bauteile problemlos in der Simulation ausgetauscht werden, ohne das Fahrzeug wieder im Verbund vermessen zu müssen.

Wie schon bei der klassischen TPA kann auch bei der komponentenbasierten TPA zwischen mehreren Methoden unterschieden werden. Am bekanntesten ist die sogenannte „Blocked Force“-Methode. Das freigeschnittene Objekt wird hier fest gegen den Prüfstand eingespannt, wie in Abbildung 3 oben dargestellt. Somit wird sichergestellt, dass nur die von

der aktiven Komponente ausgehende Kraft an der Fügeverbindung betrachtet wird. Ausgehend davon, dass die Kraft zwischen Prüfstand und Objekt gleich ist, erhält man nach dem Konzept der „Equivalent Forces“:

$$f_2^{eq} = g_2^{bl} \quad (6)$$

Anzumerken ist dabei, dass die einwandfreie Bestimmung der Kraft kaum möglich ist und formal gesehen alle 6 Freiheitsgrade benötigt werden.

Im Gegensatz dazu steht das „Free Force“-Verfahren, bei dem die aktive Komponente quasi freigeschnitten und die Fügeverbindung isoliert betrachtet wird, wie mittig in Abbildung 3 dargestellt. Die Kraft kann nun als Inverse der gemessenen Admittanz gesehen werden:

$$f_2^{eq} = (Y_{22}^A)u_2^{free} \quad (7)$$

Die Messung gestaltet sich auch hier als schwierig, da einzelne Punkte zum Betrieb und zur Befestigung des Bauteils benötigt werden. Um diesem Problem zu begegnen, gibt es daneben noch den sogenannten „Hybriden Ansatz“, der die dynamische Steifigkeit der Verbindung zwischen Prüfstand und aktiver Komponente in Betracht zieht. Da auch hier die Kräfte an den Fügestellen bestimmt werden müssen, wurde die sogenannte „In Situ“-Methode entwickelt.

Die „In Situ“-Methode basiert auch auf der Untersuchung des Verbundes aus aktiver und passiver Komponente. Der Ansatz ähnelt prinzipiell der Matrix-Inversion und stützt sich auf die Untersuchung von vielen Beobachtungen rund um die Fügestellen. Die zu bestimmende Kraft ergibt sich aus:

$$f_2^{eq} = (Y_{42}^{AB}) + u_4 \quad (8)$$

Die „Equivalent Forces“ können dabei im Verbund bestimmt werden.

Wie bereits ausgeführt, werden die Ergebnisse vor allem als Eingangsmessungen für die Simulation verwendet. Daher stehen auch diese komponentenbasierten TPA-Verfahren insbesondere zu Beginn des Entwicklungsprozesses im Fokus.

TPA basierend auf dem Übertragungsverhalten

Die bisher genannten Verfahren versuchen, ein Gesamtsystem möglichst umfassend physikalisch zu beschreiben. Dafür wird ein hoher Aufwand bei der Messdatenerfassung in Kauf genommen. In vielen Fällen ist allerdings nur eine Bewertung der Beiträge einzelner Quellen bzw. Transferpfade zur Antwortposition von Interesse. Daneben scheint es sinnvoll, den Messablauf wesentlich zu beschleunigen und zu versuchen, die Beiträge anhand von Betriebsmessungen zu quantifizieren. Die dritte Gruppe der TPA-Methoden stützt daher ihre Analysen auf dem Übertragungsverhalten zwischen dedizierten Antwort- und Anregepositionen. Der wohl bekannteste Ansatz ist hierbei die „Operational Transfer Path Analysis“ (OTPA) [3]. Bei der OTPA wird die Matrix T_{34} mittels der Korrelation zwischen u_3 und u_4 bestimmt. Hierfür wird das Gesamtsystem unter verschiedenen Lastzuständen beobachtet. Dies können unterschiedliche Drehzahlbereiche, Fahrgeschwindigkeiten oder Drehmomente sein. Im einfachsten Fall wird auf einer

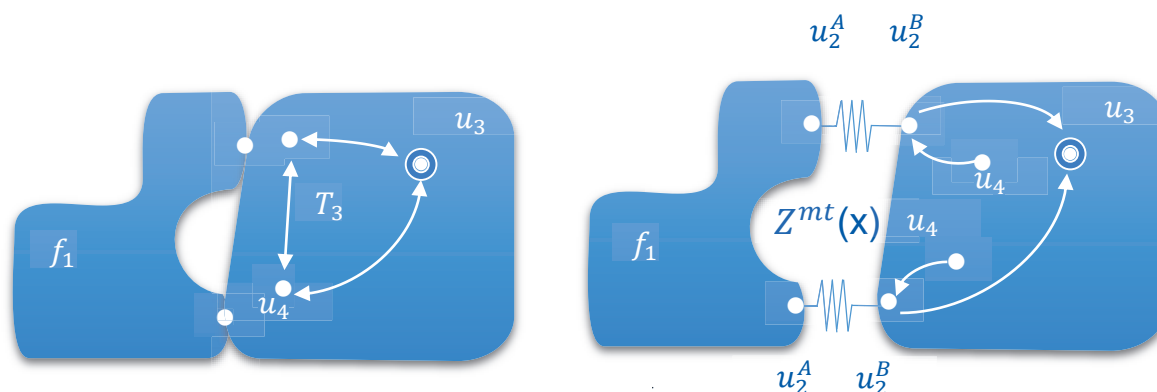


Abbildung 4: Schematische Darstellung der TPA basierend auf dem Übertragungsfunktionen. Links die OTPA, rechts die OPAX

Rolle ein Hochlauf durchgeführt. Aus der Vielzahl an Messungen, respektive des in Drehzahlbereiche unterteilten Hochlaufs, kann nun die Übertragungsmatrix bestimmt werden. Analog zur klassischen TPA erhält man:

$$u_3 = T_{34}u_4 \quad (9)$$

eine Übertragungsfunktion zwischen Anrege- und Antwortpositionen.

Für die OTPA müssen die Messpositionen für Beschleunigungsaufnehmer und Mikrofone wohl überlegt sein. Anderenfalls läuft man Gefahr, wichtige Pfade zu vergessen oder bezieht ein und dieselbe Quelle mehrfach ein. Ersteres ist prinzipiell nicht problematisch, wenn die absoluten Werte nicht ausschlaggebend sind, sondern ein einfaches Ranking der Quellen bzw. Transferpfade benötigt wird.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt die „Operational Path Analysis with exogeneous Inputs“ (OPAX). Sie stellt einen hybriden Ansatz dar, der die beiden klassischen Verfahren „Matrix-Inversion“ und „TPA aus Lagersteifigkeiten“ kombiniert und dabei versucht, die Lagersteifigkeiten aus Betriebsmessungen zu bestimmen. Somit erhält man für starre Verbindungen folgende Beschreibung des Systems

$$g_2^B = Z^{mt}u_2^B \quad (10).$$

Die OPAX-Methode ist somit ein starkes Werkzeug zur Beschreibung von Strukturen. Da auch hier die FRFs der passiven Seite benötigt werden, ist das Verfahren leicht aufwändiger, kann aber dennoch in den Kreis der Troubleshooting-Methoden aufgenommen werden. Ähnlich wie die OTPA kann auch die OPAX insbesondere gegen Ende des Entwicklungsprozesses eingesetzt werden. Hierzu gehören insbesondere die schnelle Fehlersuche beim Anlauf von neuen Modellen und während der Produktion zur Qualitätssicherung.

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden vielfältige Methoden zur Transferpfadanalyse auf ihre Funktionsweise und mögliche Anwendungsgebiete untersucht.

Zur genauen Beschreibung des Verbunds von aktiven und passiven Komponenten werden insbesondere die klassischen Verfahren verwendet. Die komponentenbasierten Ansätze sind die Grundlage für die Eingangsgrößen der Simulation.

Insbesondere die OTPA eignet sich aufgrund von Betriebsmessungen als Analysebasis als Troubleshooting-Werkzeug. Für alle Verfahren gilt allerdings, dass ein mechanisches Grundverständnis benötigt wird, um fragwürdige Aussagen zu vermeiden.

Zukünftig kann es daher erforderlich sein, den Anwender sowohl bei der Auswahl der Punkte als auch bei der Messungsdurchführung stärker zu unterstützen. So könnte beispielsweise ein Maß für die Güte der Messung eingeführt werden.

Literatur

- [1] M. V. van der Seijs, D. de Klerk, D. J. Rixen, *General framework for transfer path analysis: History, theory and classification of techniques*, Mechanical Systems and Signal Processing, Volumes 68–69, February 2016, Pages 217-244, ISSN 0888-3270
- [2] H. van der Auweraer, P. Mas, S. Dom, A. Vecchio, K. Janssens, P. van de Ponselee, *Transfer Path Analysis in the Critical Path of Vehicle Refinement: The Role of Fast, Hybrid and Operational Path Analysis*, Technical Report 2007-01-2352, SAE Technical Paper, 2007, <http://dx.doi.org/10.4271/2007-01-2352>.
- [3] D. De Klerk, and A. Ossipov *Operational transfer path analysis: Theory, guidelines and tire noise application* *Mechanical Systems and Signal Processing* 24.7 (2010): 1950-1962.