

Projekt

Transferpfadanalyse - TPA

eingereicht zum

Universitätsforschungspreis der Industrie 2009

von

Dr. Alois Sontacchi

Institut für Elektronische Musik und Akustik
der
Universität für Musik und darstellende Kunst Graz

Graz, 2009

Projekt „Transferpfadanalyse - TPA“

Die im Fahrzeuginnenraum auftretenden Störgeräusche werden vorrangig durch Geräuschquellen im Motorraum (Antrieb & Abgasanlage, Pumpen etc.), durch Rollgeräusche und bei höheren Geschwindigkeiten auch durch Strömungsgeräusche verursacht. Das Projekt Transferpfadanalyse beschäftigte sich primär mit der Beschreibung und Optimierung der Störschallemission im Fahrzeuginnenraum von Personenkraftwagen, die durch den Antrieb verursacht wird. Ziel des Projektes, das durch die AVL Graz List GmbH initiiert wurde, war ein Messverfahren zu entwickeln, das den erwähnten Aufgaben gerecht wird. Mit diesem Messverfahren sollte Akustikingenieure am Fahrzeugprüfstand, aber auch in der Konstruktion, ein Tool an die Hand gegeben werden, welches für die frühzeitige Erkennung von mechanischen Problemstellen bei der Störschallübertragung eingesetzt werden kann. D.h. neben der Fehlerbehebung an bestehenden Fahrzeugen steht auch die Vision der Fehlervorbeugung durch Computersimulationen im Blickpunkt, welche in heutigen Produktionsprozessen von großer Bedeutung und Interesse sind. Die Methodik der TPA ist seit langer Zeit in der Automobilindustrie in Verwendung. Verschiedene kommerzielle Systeme sind am Markt verfügbar. Aber in der Praxis verhärten sich die Zweifel an der Zuverlässigkeit und Aussagekraft der vorhandenen Systeme. Daher wurde dieses Projekt für eine genauere Analyse der bestehenden Verfahren injiziert und mögliche Mängel durch neue Ansätze zu beheben.

Bei den Anforderungen an ein solches Messsystem treten folgende drei Ziele in den Vordergrund:

- **Genauigkeit und Zuverlässigkeit**
- **Kurze Messdauer, da Prüfstandszeiten sehr teuer sind**
- **Messaufwand**

Zum Aspekt Genauigkeit und Zuverlässigkeit zeigte eine am Beginn des Projektes angesiedelte Untersuchung an realen Fahrzeugen mit drei bestehenden kommerziellen Verfahren, dass diese gravierende Unterschiede bei der Transferpfadanalyse aufweisen.

In Abbildung 1 sind diese Ergebnisse zusammengefasst. Die drei Verfahren sind jeweils nebeneinander dargestellt. In den oberen einzelnen Zeilen befinden sich in Farbe kartiert die frequenzabhängigen Anteile der einzelnen Schallausbreitungspfade für Luft- und Körperschall. In den letzten beiden Zeilen befindet sich die Gegenüberstellung der Messung und der Verfahrensberechnung für den Innenstörerschallpegel.

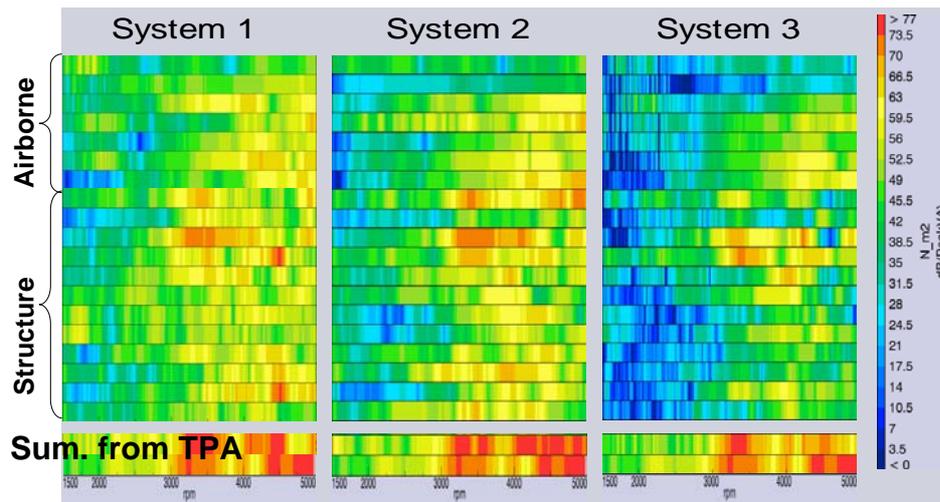


Abb. 1: TPA Ergebnisse zur Untersuchung der 2. Motorordnung für ein Mittelklasse Fahrzeug von drei unterschiedlichen Analysensysteme (**oben**) und Vergleich des Störschallanteils im Innenraum für die 2. Ordnung gemessen vs. berechnet durch das jeweilige TPA-Verfahren (**unten**).

Anhand dieser Messungen konnte nachgewiesen werden, dass eine Vorhersage – d.h. eine Vorausberechnung - für den Störschall im Fahrzeuginnenraum nur bedingt möglich ist. Bei den Messungen wurden Abweichungen in der Größenordnung von +/- 10dB (Unsicherheitsbereich entspricht einem Faktor 100 der ermittelten Größe) über weite Frequenzbereiche festgestellt. Darüber hinaus lieferten die drei Systeme divergierende Ergebnisse der Einzelpfadanalysen. Diese Divergenz hätte zur Folge, dass je nach Einsatz des gewählten Messverfahren unterschiedliche Fehlerbehebungen (an unterschiedlichen Orten) in Folge zum Einsatz kommen würden.

Bei den herkömmlichen Verfahren stellt die TPA Analyse einen aufwendigen zeitintensiven Prozess dar. Neben der großen Anzahl von Messkanälen (ca. 50 Kanäle kommen in der Praxis zum Einsatz) dauert der Messablauf durch erforderliches sequentielles (z. T. wiederholtes) Messen an den unterschiedlichen Kanälen (Übertragungs- und Betriebsmessungen) entsprechend lang. Einige Messverfahren empfehlen sogar für die genaue Vermessung der Übertragungseigenschaften den Aus- und anschließenden Rückbau von Aggregaten (Stichwort 2-Tor Übertragungskoeffizienten). Diese Anforderungen sind mit sehr großem Aufwand verbunden, außerdem werden durch Aus- und Einbau des Antriebsmotors die physikalischen Bedingungen an der Fahrzeugstruktur massiv verändert und dadurch die korrekte Auswertung der Messergebnisse erschwert. Neben der umfassenden Messhardware werden Messingenieure mit langjähriger Erfahrung und ausgezeichneten Kenntnisse im Maschinenbau benötigt, um aus den diversen Ergebnissen eine plausible Erkenntnis zu gewinnen und weitere Entscheidungsprozesse einzuleiten.

Im Rahmen des Projektes wurden umfangreiche Voruntersuchungen (Sensitivitätsmessungen) durchgeführt und verschiedene Analyseparadigmen evaluiert, die Auskunft über die mögliche Fehlerquellen liefern (siehe Abb. 2).

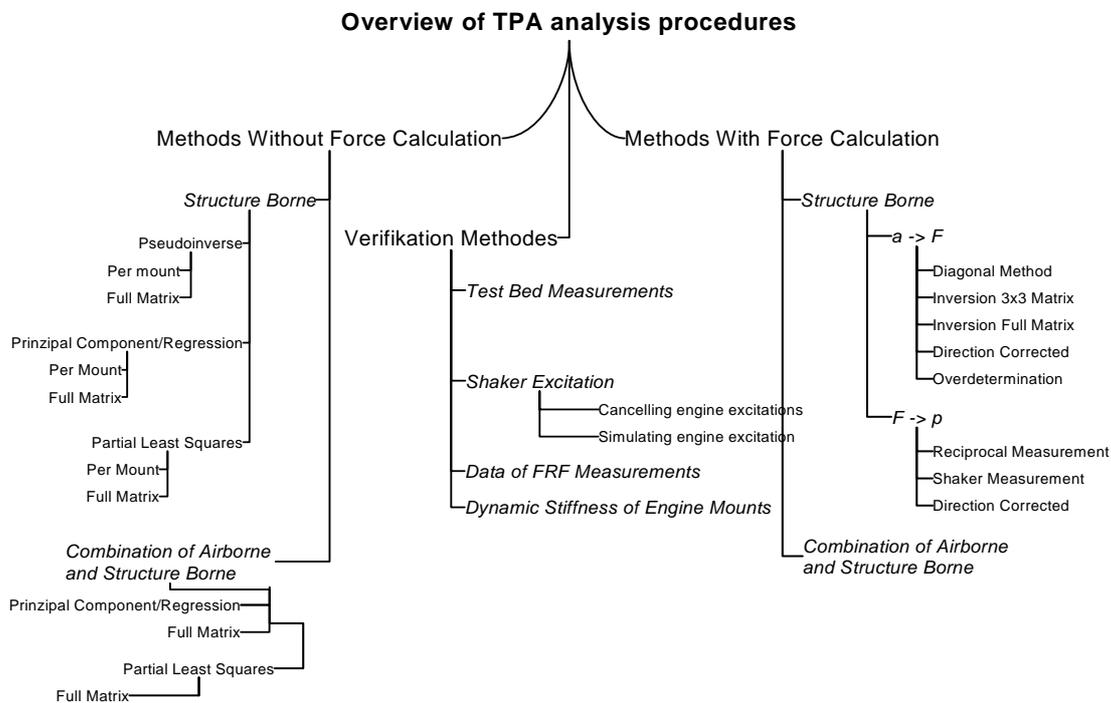


Abb. 2. Überblick über untersuchte Prozeduren zur Bestimmung der Übertragungseigenschaften.

Die Anregung der Struktur erfolgt mit Shaker, Impulshammer und/ oder Luftschallquellen. Die Messung von Impedanzen an den Einleitungsorten der Anregungen - den Motorlagern - erfolgt durch Messung von Beschleunigungen vor bzw. nach Lager. Durch die gleichzeitige Luftschallmessung im Fahrzeuginnenraum wird die Übertragungsfunktionen zwischen Kraft am Einleitungsort und Schalldruck im Fahrzeuginnenraum bestimmt. Durch Kenntnis von diesen Impedanzen und Übertragungsfunktionen können bei Betriebsmessungen auf der Messrolle die vom Motor induzierten Kräfte in den Lagern bestimmt werden.

Aus den Voruntersuchungen konnten folgende Messparameter für die Messgenauigkeit zentral festgemacht werden:

- **Reproduzierbarkeit der Messpositionen**
- **Abweichungen von der Anregungsrichtung**
- **Änderungen der Temperatur bei Übertragungs- und Betriebsmessung**
- **Ermittlung & Berücksichtigung des Übersprechens zwischen den Ausbreitungspfaden**

In Abbildung 3 und 4 sind typische Abweichungen, die sich aufgrund geringer Veränderungen der oben genannten Messparameter ergeben können, anhand realer Messungen dargestellt.

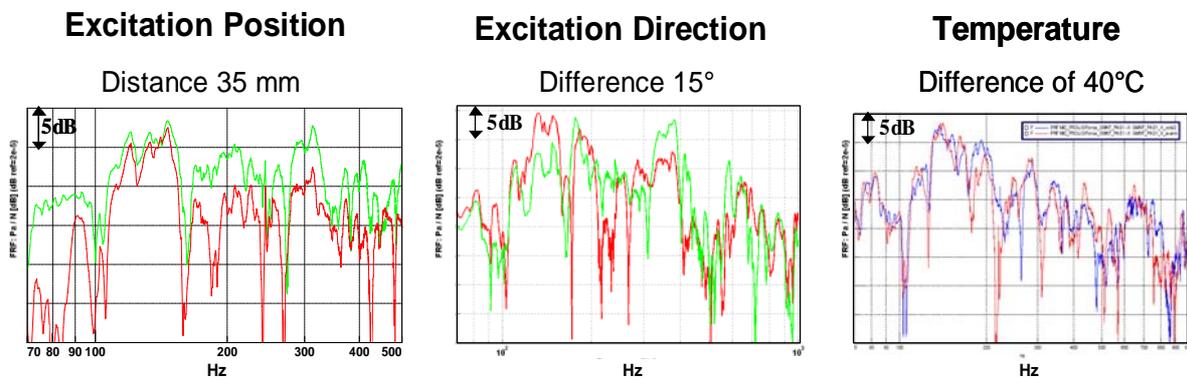


Abb.3. (*links*) Abweichung der Anregungsposition. (*mitte*) Abweichung der Anregungsrichtung, (*rechts*) Temperaturabhängigkeit (20° bzw. 60°C)

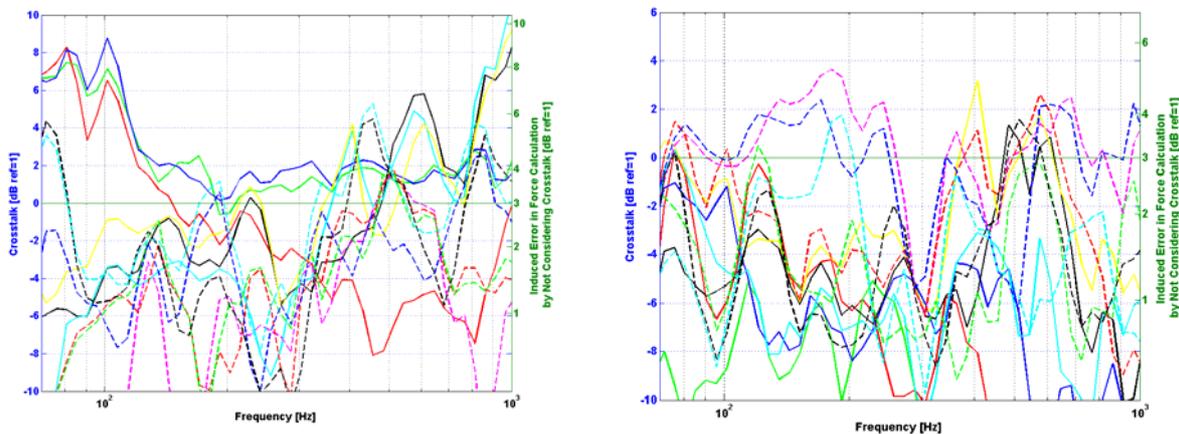


Abb.4. (*links*) Übersprechen von Schwingungen innerhalb der Anregungsrichtungen (x,y,z) bei diversen Motorlagern, (*rechts*) Übersprechen von Schwingungen zwischen den diversen Motorlagern.

Auf Basis der Sensitivitätsanalyse wurde ein neues Messverfahren entwickelt, das sich durch 2 grundlegende Innovationen auszeichnet. Das Verfahren ist mittlerweile durch entsprechende Patente [1],[2] geschützt und wurde bereits mehrfach publiziert [3] - [7]. Dieses Verfahren wird im Folgenden beschrieben.

Die Messung der Übertragungsfunktionen erfolgt reziprok. Dadurch können sämtliche Übertragungswege gleichzeitig erfasst werden. Die Abweichung von den tatsächlichen Krafteinleitungspunkten wird reduziert aufgrund der leichteren Zugänglichkeit (Messaufnehmer sind um vieles kleiner als mechanische Anregungsquellen) und kann überdies durch Anbringung von mehreren Aufnehmern und anschließender topologisch gewichteter Mittelung nahezu eliminiert werden. Erfolgt diese Reziprokmessung direkt nach den Betriebsmessungen kann der Temperatureinfluss ebenfalls ausgeschlossen werden. Darüber hinaus stellt diese Vorgangsweise eine immense Zeitersparnis gegenüber herkömmlichen Verfahren (Faktor 3-5) dar.

Als weiteres Novum wurde für die vollständige Beschreibung des Systems ein Berechnungsverfahren entwickelt, das die nicht vorhandene Zugänglichkeit der Kräfte im Betriebszustand löst. Neben der Bestimmung der üblichen Übertragungsfunktionen „Schalldruck im Innenraum zu Kraft am Einleitungspunkt“ (**FRF**, Frequency Response Function) – hier nun reziprok ermittelt - erfolgt eine Bestimmung der Inertanzen (**I**, „Beschleunigung am Anregungspunkt zu Kraft am Einleitungspunkt“, ebenso Übertragungsmessung) und der Sensitivitäten (**sens**, „Schalldruck im Innenraum zu Beschleunigung am Anregungspunkt“) durch Messsignale aus der Betriebsmessung. Diese Herangehensweise führt zum neuen Messverfahren **TPA-FORM (Transfer Path Analysis From Operational Measurements)** und ist schematisch in Abbildung 5 dargestellt.

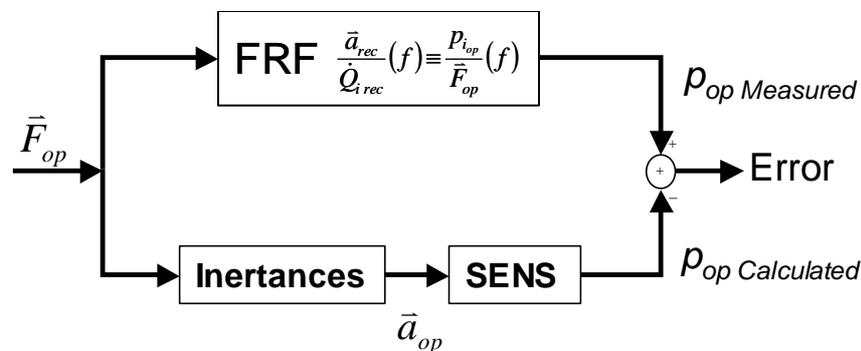


Abb.5. Strukturbeschreibungsbild für das mathematische Berechnungsmodell.

Die mathematische Modellierung und die damit verbundenen Algorithmen stellen das zentrale Kernstück des neuartigen Verfahrens **TPA-FORM** dar. Basierend auf digitaler Signalverarbeitung wurden diese Algorithmen für die Anwendbarkeit in der Praxis implementiert und anhand synthetischer und realer Daten evaluiert. Die Bestimmung der Sensitivitäten erfolgt wie bereits oben erwähnt durch Betriebsmessungen und liefert daher neben genaueren Daten diese auch noch effizienter. Das spezielle mathematische Verfahren ist in den Grundzügen in der eingereichten Patentschrift [2] beschrieben.

Verkürzt lässt sich die vorgeschlagene neue Vorgangsweise wie folgt erklären: Für unterschiedliche operative Zustände werden sämtliche Beschleunigungen an der Karosserie und Schalldrücke im Motor- als auch im Fahrzeugraum erfasst. Sämtliche Anregungssignale werden je nach Zuteilung der Einleitungspunkte in einer beschreibenden Systemmatrix zusammengefasst. Die Antwortsignale im Fahrzeuginnenraum werden in einem Zielvektor abgebildet. Die gesuchten Sensitivitäten, die den Zusammenhang zwischen Systemmatrix und Zielvektor beschreiben, werden im Spektralbereich unter Berücksichtigung von signalsetabhängigen Parametern (diese werden bei Auswertung aus den Daten erhoben), von in Software eingebettetes Messtechnik-Expertenwissen und von

physikalischen Aspekten (Glättung zwischen benachbarten Frequenzpunkten, und Luft- und Körperschall spezifische Gewichtungskurven) ermittelt. Dazu bedient man sich mathematischer Lösungsmethoden für überbestimmte Gleichungssysteme mit Nebenbedingungen, die für die konkrete Anwendung adaptiert wurden.

Das interdisziplinäre Projekt- & Forscherteam setzt sich aus drei Grazer Institutionen (AVL, ACC, KUG) zusammen. Das Forschungsprojekt wurde von Steirische Wirtschaftsförderung SFG gefördert. Für die Messtechnik und die Projektleitung zeichnete das Akustikkompetenzzentrum Graz verantwortlich. Die Akustikabteilung der AVL List GmbH sorgte als Projektinitiator für das autospezifische Expertenwissen, für die erforderlichen messtechnischen Einrichtungen und die Möglichkeiten der Umsetzung, Marketing & Vertrieb. Das Institut für Elektronische Musik und Akustik der Kunstuniversität Graz entwickelte die Grundlagen für den neuen Verfahrensentwurf und das Know-how für die Umsetzung der digitalen Signalverarbeitung. Aufgrund der komplementären Kompetenzbereiche der drei Projektpartner kann das Team den interdisziplinären Herausforderungen gerecht werden.

Mit Juni 2008 wurde das Projekt der drei Kooperationspartnereinrichtungen erfolgreich abgeschlossen. Für die Umsetzung eines vermarktungsfähigen Software-Messtool hat die AVL die KUG mit der Implementierung der Signalverarbeitung beauftragt. Ein Vermarktungsbeginn dieser Software ist mit Mitte 2009 geplant.

Forschungskooperationspartner:

- AVL** LIST GMBH
Hans-List-Platz 1 A 8020 Graz
- ACC** Akustikkompetenzzentrum
Gesellschaft für Akustik mbH, Inffeldgasse 25, A-8010 Graz
- KUG** Institut für Elektronische Musik und Akustik,
Kunstuniversität Graz, Inffeldgasse 10/3, A-8010 Graz

Fördergeber:

Steirische Wirtschaftsförderung SFG

Eckdaten:

Projektbeginn: Juli 2006
Laufzeit: 2 Jahre
Ende Juni 2008

Projektweiterführung durch AVL für die Softwareumsetzung
Projektpartner: AVL-List GmbH Graz & IEM (KUG)
Start: Nov. 2008
Ende: Juni 2009

Patente

[1] AVL – Patent A792/2007, 55529, "Verfahren zur Berechnung richtungskorrigierten Übertragungsfunktionen und/oder richtungskorrigierten Impedanzgrößen in einer Transferpfadanalyse einer schwingenden Struktur", AT 503 211 A2.

[2] AVL – Patent A210/2008, Patentapplikation 55625, "Übertragungsweg Analyse (Transfer-Pfad-Analyse-TPA)", AT 504424 A2.

Publikationen

[3] Brandl S., Priebisch H.-H., Brandl F., Biermayer W., Höldrich R., Sontacchi A., "Challenges and New Solutions for Transfer Path Analysis", ISMA2008, 15-17 September 2008, Leuven.

[4] Biermayer W., Brandl F., Höldrich R., Sontacchi, A., Brandl, S., Priebisch, H. H., "Efficient Transfer Path Analysis for Vehicle Sound Engineering JSAE", JSAE Sound Engineering 2008.

[5] Brandl S., Biermayer W., Höldrich R., Sontacchi A.: "Optimised TPA approach for improving interior sound engineering", 5th International Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress in cooperation with SAE, Graz 2008.

[6] Sontacchi A., Höldrich R., Brandl S., Fließner W., Biermayer W., Brandl F.: „Transfer Path Analysis Experimental Investigations and Modeling” , Proceedings of the 3rd Congress of the Alps Adria Acoustics Association, Graz, Austria, September 27-28, 2007

[7] Biermayer W., Brandl F., Höldrich R., Sontacchi A., Brandl S., Fließner W. : „Sound Engineering based on Source Contributions and Transfer Path Results”, JSAE Annual Congress Proceedings (Spring) No 68-07, Japan.