

Beitragsanalyse von Fahrzeuggeräuschen mittels operationeller Transferpfadanalyse

Jakob Putner¹, Dejan Arsić²

¹ MAHLE Powertrain GmbH, E-Mail: jakob.putner@mahle.com

² Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH, E-Mail: darsic@muellerbbm-vas.de

Einleitung

Bei der Beitragsanalyse wird ein Gesamtgeräusch einer komplexen Struktur untersucht und auf die Beiträge einzelner Schallquellen aufgeteilt. Hierzu ist die Identifikation aller dominanten, zum Gesamtgeräusch beitragenden Quellen Voraussetzung. Ebenso ist die Charakterisierung der Übertragungspfade zum Empfänger essentiell. Die Kenntnisse über Geräuschentstehung und -übertragung sind ein wichtiges Werkzeug für eine effiziente Entwicklung des Gesamtgeräuschs und die Optimierung der Klangqualität. Die Analyse der Übertragungspfade wurde mittels operationeller Transferpfadanalyse (OTPA) durchgeführt. Hierzu werden Quellen und Empfänger in verschiedenen Betriebszuständen des Versuchsobjekts zeitsynchron erfasst. Dadurch ist keine separate Messung von Schallquellen und Übertragungswegen notwendig. Jedoch ist eine detaillierte Planung, sowie eine genaue Kenntnis der dominanten Schallquellen, für ein aussagekräftiges Ergebnis unabdingbar. Veranschaulicht wird die Beitragsanalyse anhand einer Untersuchung eines PKW. Vor der Messung zur Transferpfadanalyse (TPA) wurden die dominanten Schallquellen, zum Beispiel durch Schallortung, identifiziert und deren gezielte Erfassung durch Mikrofone und Beschleunigungsaufnehmer getestet. Zur Bestimmung der Beiträge der dominanten Schallquellen wurde eine Messung an einem Fahrzeugrollenprüfstand durchgeführt. Die so ermittelten vielkanaligen Messergebnisse konnten mittels operationeller Transferpfadanalyse verarbeitet und die Beiträge synthetisiert werden. Diese Erkenntnisse können einer effizienten Problembehebung und der gezielten Klanggestaltung dienen.

Simulierte Vorbeifahrt

Eine etablierte Methode für die Messung und Bewertung des Fahrzeugaußengeräuschs ist die simulierte Vorbeifahrt. Hier wird eine reale Vorbeifahrt, ohne äußere Einflüsse wie Witterung oder andere Fahrzeuge auf der Teststrecke, auf einem Rollenprüfstand simuliert. Bei Vorbeifahrtmessungen nach ISO 362-1:2015 [1] fährt das Fahrzeug auf der Teststrecke zwischen zwei Mikrofonen hindurch. Die ermittelten Schalldruckpegel sind unter anderem relevant für die Zulassung des Fahrzeugtyps, wobei die gesetzlichen Anforderungen stetig steigen. Darüber hinaus ist ein hochwertiges Fahrzeugaußengeräusch auch für den Kunden wichtig und prägt die Wahrnehmung der Marke.

Bei der simulierten Vorbeifahrt fährt das Fahrzeug nicht an den Mikrofonen vorbei, sondern ist auf einem Rollenprüfstand fixiert. Dieser befindet sich in der Mitte eines

großen reflexionsarmen Halbraums und zu beiden Seiten des Fahrzeugs sind Mikrofone für die simulierte Vorbeifahrt aufgestellt. So kann der vom Fahrzeug abgestrahlte Schall in verschiedenen Winkeln erfasst werden.

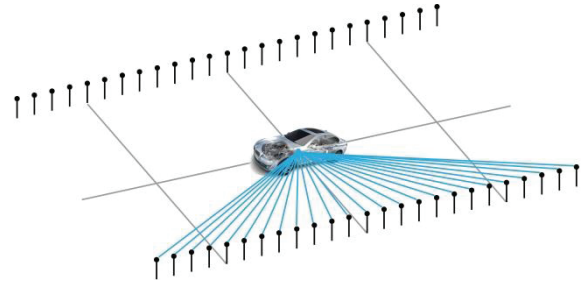


Abbildung 1: Aufbau eines simulierten Vorbeifahrtprüfstands, das Fahrzeug ist auf einem Rollenprüfstand fixiert und auf beiden Seiten befinden sich die Mikrofone der simulierten Vorbeifahrtstrecke.

Das Fahrzeug fährt auf dem Rollenprüfstand die verschiedenen Fahrzyklen, wobei die Mikrofonensignale synchron erfasst werden [2]. Aus diesen Mikrofonensignalen kann im Anschluss ein Vorbeifahrtssignal simuliert werden, bei dem das Fahrzeug, entlang der gedachten Vorbeifahrtstrecke fährt und den Beobachtungspunkt auf der Nulllinie passiert.

Operationelle Transferpfadanalyse

Für die Analyse der einzelnen Beiträge zum Gesamtgeräusch kommen Transferpfadanalysen (TPA) zum Einsatz. Mit diesen werden die Transferpfade zwischen den Quell- und den Antwortpositionen bestimmt und anschließend mittels Transferpfadsynthese (TPS) die Beiträge der einzelnen Quellen bestimmt.

Für die Beitragsanalyse des Fahrzeugaußengeräuschs wurde die Methode der operationellen Transferpfadanalyse verwendet [3]. Zur Bestimmung der Transfercharakteristika werden Betriebsmessungen verwendet, in Betriebszuständen wie sie bei der simulierten Vorbeifahrt ohnehin gemessen werden. Eine Anregung des gesamten untersuchten Frequenzbereichs, wie beispielsweise bei einem Drehzahlhochlauf, ist hier für aussagekräftige Ergebnisse wichtig.

Im Falle der simulierten Vorbeifahrt, entsprechen die Antwortpositionen den Vorbeifahrtmikrofonen. Die Quellen am Fahrzeug werden durch Sensoren an den Referenzpositionen charakterisiert. Bei der Auswahl der Referenzpositionen ist es wichtig, dass zum einen die

einzelne Schallquelle möglichst gut abgebildet wird und dass alle dominanten Quellen am Fahrzeug erfasst werden [4]. Für die Auswahl der Referenzpositionen können zum Beispiel Schallortungsmessungen herangezogen werden, aber auch auf Untersuchungen zur Positionierung der Sensoren zurückgegriffen werden [5, 6].

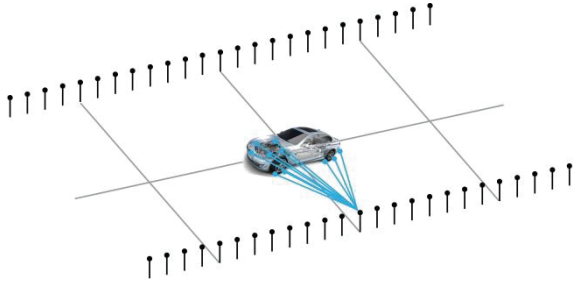


Abbildung 2: Erweiterung des simulierten Vorbeifahrtprüfstands um die Referenzsensoren, mit denen die Schallquellen am Fahrzeug für die operationelle Transferpfadanalyse bestimmt werden.

Um zusätzlichen Aufwand, im Vergleich zur simulierten Vorbeifahrt ohne Beitragsanalyse, möglichst gering zu halten, wurden die Schallquellen ausschließlich durch ausgewählte Mikrofonpositionen am Fahrzeug charakterisiert. Dies ermöglicht einen gewissen Grad an Standardisierung, um die die Beitragsanalyse in typische Abläufe zu integrieren und einen zusätzlichen Mehrwert aus diesen Messungen zu ziehen.

Nachdem die Transfercharakteristika mittels OPA bestimmt wurden, können die Beiträge für verschiedene Betriebszustände mit den gemessenen Quellsignalen berechnet werden.

Ergebnisse

Wie bereits angedeutet, gibt es einige Faktoren, die Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse der Beitragsanalyse haben. Hierzu zählen vor allem die Variation in den zu Grunde liegenden Betriebsmessungen und die Platzierung der Referenzsensoren an den Quellen. Um die Messungen zu validieren, werden zunächst gemessenes und synthetisiertes Fahrzeugaußengeräusch in konstanten Fahrzuständen verglichen. Für die Validierung des verwendeten Ablaufs wird im Anschluss der gemessene und der synthetisierte Rollgeräuschanteil verglichen. Ein Beispiel für die Ergebnisse der Beitragsanalyse einer simulierten Vorbeifahrt wird darauf folgend gegeben.

Vergleich des gemessenen und synthetisierten Fahrzeugaußengeräuschs

Um die Qualität des synthetisierten Fahrzeuggeräuschs zu bewerten, werden alle berechneten Beiträge zum Gesamtgeräusch aufsummiert und mit dem gemessenen Außengeräusch verglichen. In Abbildung 3 sind gemessenes und synthetisiertes Außengeräusch für zwei Fahrzustände

mit konstanter Motordrehzahl von 1500 und 3000 Umdrehungen pro Minute dargestellt. Die Antwortposition für Messung und Simulation ist das Mikrofon auf der Nulllinie der Vorbeifahrtstrecke.

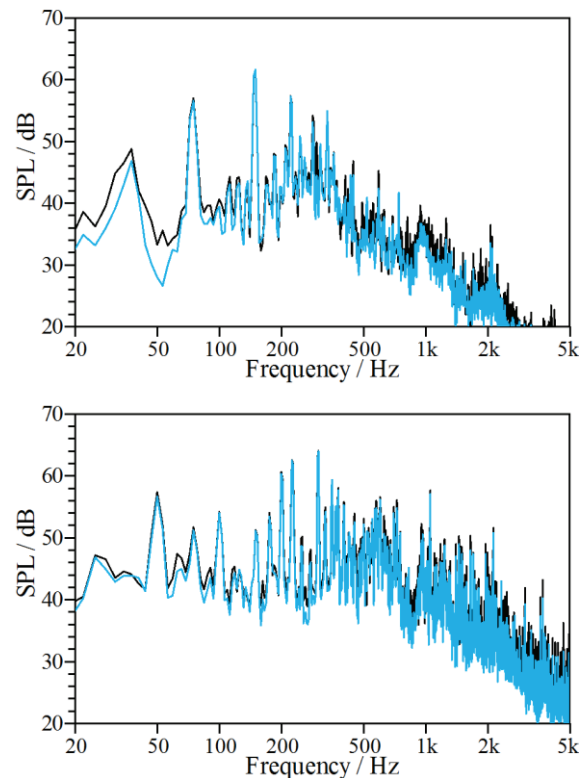


Abbildung 3: Gemessenes (schwarz) und synthetisiertes (blau) Fahrzeugaußengeräusch, bei konstanter Motordrehzahl von 1500 UpM (oben) und 3000 UpM (unten).

Vergleicht man die Kurven in Abbildung 3, fällt die sehr gute Übereinstimmung von gemessenen und synthetisiertem Gesamtgeräusch auf. Durch die Synthese wird das gemessene Signal sehr gut angenähert, wobei die Synthese das Außengeräusch etwas unterschätzt, im Mittel jedoch um weniger als 1,5 dB. Der geringe Unterschied lässt darauf schließen, dass keine dominanten, inkohärenten Quellen vernachlässigt wurden und die TPS das Gesamtsignal sehr gut wiedergibt.

Vergleich des gemessenen und synthetisierten Rollgeräuschs

Nachdem die tatsächlichen Beiträge der einzelnen Schallquellen in der Regel vor der Beitragsanalyse unbekannt sind, können diese nicht ohne weiteres validiert werden. Auf dem Rollenprüfstand kann jedoch das Rollgeräusch gemessen werden, dazu wird der Motor abgeschaltet und die Räder werden vom Prüfstand angetrieben. Das so gemessene Geräusch entspricht, auf Grund des veränderten Lastzustands, nicht exakt dem tatsächlichen Rollgeräusch, kann aber dennoch für einen

Vergleich von gemessenem und synthetisiertem Rollgeräusch herangezogen werden.

In Abbildung 4 sind gemessenes und synthetisiertes Rollgeräusch gegenübergestellt. In der oberen Grafik fallen die zwei Spitzen bei 75 Hz und 150 Hz auf, diese entsprechen bei 1500 UpM der 3. und 6. Motorordnung. Dies weist daraufhin, dass im synthetisierten Rollgeräusch auch Anteile des Motorgeräuschs vorhanden sind. Bei der Positionierung der Mikrofone, ist es nicht immer möglich, nur eine einzelne Quellen aufzunehmen. Das übersprechen zwischen den Kanälen wird zwar teilweise durch die OTPA kompensiert, dennoch können Anteile anderer Quellen im Beitrag einer Quelle vorkommen. Vergleicht man die Pegel bei 75 Hz und 150 Hz mit dem Beitrag des Motors, oder dem Gesamtgeräusch, liegen diese mindestens 7 dB über dem synthetisierten Beitrag der Reifen. Die dominante Schallquelle kann also auch in diesem Fall eindeutig identifiziert werden.

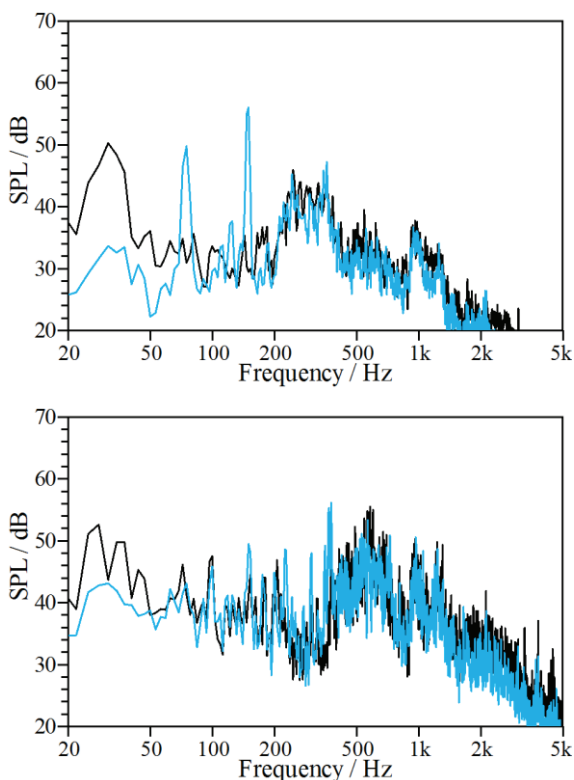


Abbildung 4: Gemessenes (schwarz) und synthetisiertes (blau) Rollgeräusch, bei konstanter Motordrehzahl von 1500 UpM (oben) und 3000 UpM (unten).

Davon abgesehen, stimmen gemessenes und synthetisiertes Reifengeräusch sehr gut überein und die Unterschiede liegen im Mittel bei weniger als 1 dB. Dies gilt auch für 3000 UpM Motordrehzahl, in Abbildung 4 unten dargestellt. Die 3. und 6. Motorordnung sind hier bei 150 Hz und 300 Hz vorhanden, jedoch nicht so deutlich ausgeprägt wie bei 1500 UpM. Über den gesamten Frequenzbereich betrachtet,

wird der Beitrag des Rollgeräuschs durch die Synthese sehr gut angenähert.

Vergleich der gemessenen und synthetisierten Vorbeifahrt

Bisher wurden die Ergebnisse der Beitragsanalyse für eine einzelne Mikrofonposition betrachtet. Analysiert man nun die Beiträge jeder Teilschallquelle zu jedem Vorbeifahrtmikrofon, kann daraus eine Beitragsanalyse für die simulierte Vorbeifahrt errechnet werden.

Eine Gegenüberstellung von Messung und Synthese der simulierten Vorbeifahrt ist in Abbildung 5 dargestellt. In der realen Vorbeifahrt würde das Fahrzeug hier auf der Teststrecke beschleunigen und das Außengeräusch von einem Mikrofon auf der Nulllinie gemessen. Bei der simulierten Vorbeifahrt wird die entsprechende Lastsituation auf dem Rollenprüfstand gefahren und das Signal der Mikrofone zu dem Signal auf der Nulllinie interpoliert, in Abhängigkeit von der Position auf der gedachten Vorbeifahrtstrecke. Entsprechend dargestellt ist der Gesamtpegel über der Position auf der Vorbeifahrtstrecke.

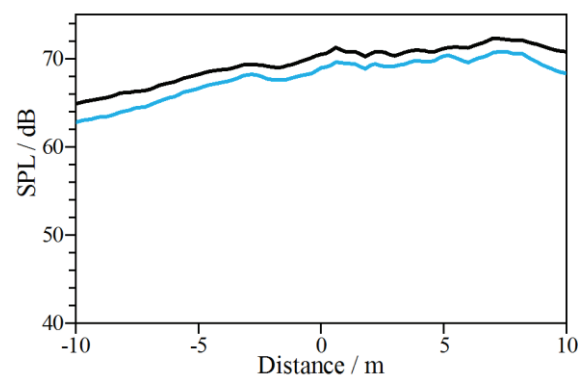


Abbildung 5: Simuliertes Vorbeifahrtgeräusch (schwarz) und synthetisiertes Gesamtgeräusch (blau) Rollgeräusch, dargestellt als Schalldruckpegel über der gedachten Vorbeifahrtstrecke.

Vergleicht man die beiden Kurven in Abbildung 5, zeigt sich, dass die Synthese das Ergebnis der simulierten Vorbeifahrtmessung sehr gut annähert. Im Mittel liegen die Unterschiede unter 2 dB.

Beitragsanalyse der Vorbeifahrt

Nachdem das Gesamtgeräusch, sowie einzelne Beiträge der Messungen validiert wurden, werden nun die Beiträge einzelner Schallquellen am Fahrzeug zum Gesamtgeräusch betrachtet. Durch die Analyse der Beiträge jeder Teilschallquelle zu jedem Vorbeifahrtmikrofon und anschließender Berechnung der simulierten Vorbeifahrt, können die am Gesamtgeräusch beteiligten Schallquellen im Detail untersucht werden. Als Ergebnis erhält man einzelne Teilschallquellen, die sozusagen am Beobachter vorbeifahren.

In Abbildung 6 sind die Beiträge der einzelnen Schallquellen am Fahrzeug zum Vorbeifahrtgeräusch dargestellt. In der Gesamtpegelbetrachtung sind die dominanten Schallquellen Räder und Motor. Während sich der Motor auf den Beobachtungspunkt zubewegt wird der Pegel höher, wenn sich das Fahrzeug von der Nulllinie entfernt steigt der Beitrag der angetriebenen Räder. Die gerichtete Abstrahlung der Quellen wird vor allem bei den Beiträgen der Abgasanlage und der Ansaugluftführung deutlich. Während sich die Schalldämpfermündung auf das simulierte Mikrophon zubewegt wird der Pegel höher, bis sie bei etwa fünf Meter das Mikrophon passiert. Danach steigt der Anteil auf Grund der Richtwirkung noch einmal an, um im Anschluss mit der Entfernung geringer zu werden.

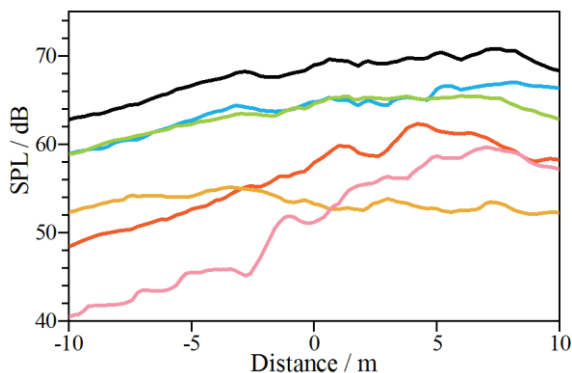


Abbildung 6: Beitragsanalyse der Vorbeifahrt: Gesamtgeräusch (schwarz), Beitrag des Motors (grün), der Räder (blau), des Getriebes (rot), der Abgasanlage (pink) und der Ansaugluftführung (braun).

Da Zeitrohdaten für alle Beiträge errechnet werden, ist eine detaillierte Analyse möglich, wie beispielhaft in Abbildung 4 gezeigt. Mit diesen Erkenntnissen wird die Änderung des Gesamtpegels beziehungsweise der Geräuschqualität wesentlich effizienter, da die dominanten Quellen identifiziert sind und gezielt beeinflusst werden können.

Zusammenfassung

Um das Fahrzeugaußengeräusch bei der simulierten Vorbeifahrt gezielt zu beeinflussen, wurde eine Methode zur Beitragsanalyse vorgestellt und das Konzept der zu Grunde liegenden Analysen erläutert. Für die Messung des Fahrzeugaußengeräuschs wurde die simulierte Vorbeifahrt genutzt und um die operationelle Transferpfadanalyse zur Bestimmung der Beiträge der dominanten Schallquellen erweitert. Bei der Messung zur simulierten Vorbeifahrt kann eine Reduzierung der zusätzlichen Messpunkte erreicht werden, wodurch der Mehraufwand bei den Messungen deutlich reduziert werden kann.

Um die Ergebnisse der Methode zu validieren, wurden Vergleiche im Frequenz- und Gesamtpegelbereich, für einzelne Beiträge, Außengeräusch und simuliertes

Vorbeifahrtgeräusch herangezogen. Das gemessene und synthetisierte Außengeräusch stimmt im gesamten Frequenzbereich überein. Beim synthetisierten Rollgeräusch kam es zu singulären Abweichungen im Bereich der Hauptmotorordnungen. Die Auswertung ermöglicht jedoch immer noch die eindeutige Identifikation der dominanten Schallquelle. Das aus der Beitragsanalyse berechnete Gesamtgeräusch stimmt gut mit dem Ergebnis der simulierten Vorbeifahrt überein. Wenn also die grundlegenden Voraussetzungen erfüllt werden, ist die Beitragsanalyse mittels operationeller Transferpfadanalyse ein verlässliches Werkzeug bei der detaillierten Betrachtung des Fahrzeugaußengeräuschs.

Als Ergebnis der Beitragsanalyse bei der simulierten Vorbeifahrt erhält man einzelne Teilschallquellen, beziehungsweise deren Geräusch bei der Vorbeifahrt am Beobachtungspunkt. Diese können im Detail zum Beispiel im Frequenzbereich analysiert werden und so weitere Schritte zur gezielten Änderung des Gesamtgeräuschs abgeleitet werden. Damit ist die Beitragsanalyse ein wichtiges Werkzeug zur effizienten Entwicklung des Fahrzeugaußengeräuschs.

Literatur

- [1] ISO 362-1:2015: *Messverfahren für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch*. Beuth Verlag, Berlin, 2015
- [2] Finsterhölzl, H., V. Caldiero, J. Hobelsberger, W. Baumann, F. Daiber: *A New Exterior Noise Testing Facility in the Development Process at BMW*. ATZ Worldwide, 108(4), 2-5, 2006
- [3] Noumura, K., J. Yoshida: *Method of transfer path analysis for vehicle interior sound with no excitation experiment*. In: *Proc. of the FISITA 2006 World Automotive Congress, Yokohama, Japan, F2006D183*, 2006
- [4] de Klerk, D., A. Ossipov: *Operational transfer path analysis: Theory, guidelines and tire noise application*. Mechanical Systems and Signal Processing, 24(7), 1950-1962, 2010
- [5] Putner, J., M. Lohrmann: *Beitragsanalyse des Fahrzeugaußengeräuschs bei der simulierten Vorbeifahrt unter Verwendung von Betriebsmessungen*. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2011, Düsseldorf, Deutschland, 131-132* (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin, 2011)
- [6] Putner, J., M. Lohrmann, H. Fastl: *Analyse von Körper- und Luftschallbeiträgen zum Fahrzeuggeräusch mittels Transferpfadanalyse aus Betriebsmessungen*. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2014* (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin, 2014)