

# Active-Road-Noise-Control (ARNC) – Einfacher Kausalitäts-Check mittels Hammer-Test im Vorfeld mit kritischer System-Latenzbetrachtung

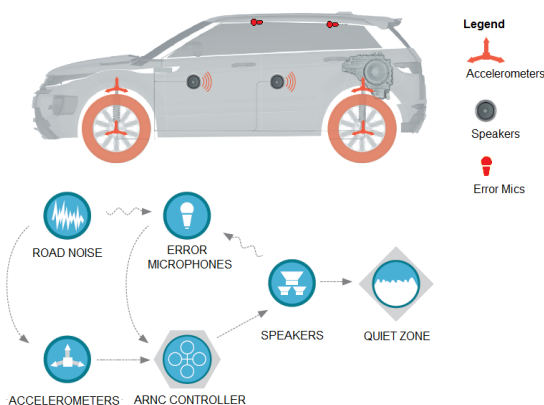
Juergen Zollner<sup>1</sup>, Dr. Nikos Zafeiropoulos<sup>1</sup>, Dr. Vasudev Kandade Rajan<sup>1</sup>, Dr. Markus Christoph<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Harman/Becker Automotive Systems GmbH, 94315 Straubing, Germany

## Einleitung

Eine aktive Road-Noise-Control (ARNC) hat sehr hohe Anforderungen an die Latenz der Sensorik und der Kontrolleinheit, wobei beide im unteren einstelligen Millisekundenbereich liegen müssen. Im Gegensatz zur aktiven Engine-Order-Control (EOC) ist der Erfolg eines ARNC-Systems von einer echt kausalen Gegenschall-erzeugung abhängig, da das Störgeräusch in der Regel immer aus einer Mischung von tonalen, stochastischen und impulshaften Signalen besteht [1]. Daher muss gerade im ARNC die Kausalitätsbedingung eingehalten werden, um einerseits gegenphasige und amplitudentreue Gegenschall-signale erzeugen zu können und andererseits eine Konvergenz, des beim ARNC verwendeten Controller-Algorithmus, gewährleisten zu können [2]. Da eine umfassende Kohärenz-untersuchung und Simulation mit anschließender System-integration mit erheblichem Kosten verbunden ist, wäre es von Vorteil, schon im Vorfeld eine erste Abschätzung über die Latenzverhältnisse mit möglichst geringem Aufwand zu erhalten. Dazu wird im Folgenden ein einfacher Kausalitäts-Check mittels Hammer-Test vorgestellt und an einem PKW der Kompaktklasse getestet. Dabei werden der Hammer-Test und dessen Ergebnisse mit resultierenden Latenz-bedingungen kritisch betrachtet und es werden die möglichen Auswirkungen und Einschränkungen auf ein ARNC-System diskutiert.

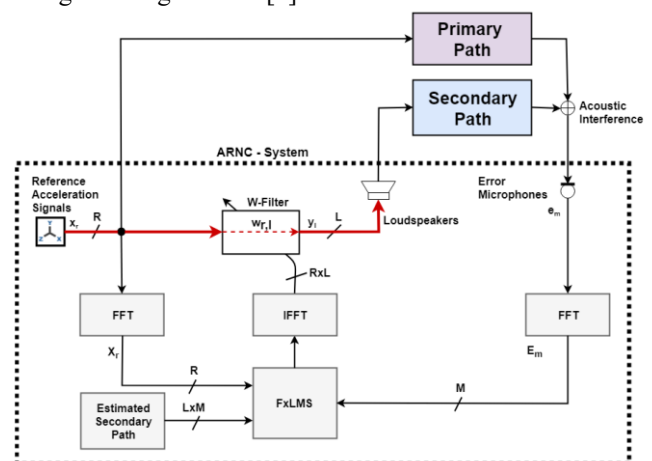
## ARNC-System

Das ARNC-System besteht aus dem ARNC-Kontroller, sowie aus digitalen Beschleunigungssensoren (B-Sensoren) zur Aufnahme von Vibrationen (Referenzsignale) und aus Fehlermikrofonen zur Aufnahme des Rollgeräusches im Innenraum (Fehlersignale), siehe Abbildung 1. Anhand der



**Abbildung 1:** ARNC-System mit systematischer Darstellung der beteiligten Komponenten im Fahrzeug inklusive B-Sensoren, Fehlermikrofone und Lautsprecher (Aktuatoren).

erfassten Referenz- und Fehlersignalinformationen kann der adaptive Algorithmus in der Kontrolleinheit in Echtzeit ein entsprechendes Kontrollsignal zur Gegenschall-signal-erzeugung generieren. Dieses Ausgangssignal wird mit den Info-/Entertainment Audiosignalen gemischt und durch die im Audiosystem des Fahrzeugs vorhandenen Tiefton-lautsprecher wiedergegeben, die damit dem ARNC-System als Aktuatoren dienen. Das ARNC-System verwendet einen angepassten FxLMS Algorithmus [3], dieser hat sich in vielen modernen ANC-Anwendungen etabliert und wird auch für strukturbasierte Rollgeräusch-Unterdrückung erfolgreich angewendet [4].



**Abbildung 2:** Blockdiagramm eines mehrkanaligen MIMO-Systems mit Primär- und Sekundärpfad unter Verwendung eines FxLMS Algorithmus.

Um eine technisch realisierbare aber auch hörbare Dämpfung auf allen Sitzpositionen zu erreichen, muss ein ARNC-System mehreren Anforderungen genügen. Da es sich um ein komplexes MIMO-System, siehe Abbildung 2 mit  $l = 1..L$  Lautsprecher-signalen,  $m = 1..M$  Mikrofon-signalen und  $r = 1..R$  Referenz-signalen, handelt, muss zum einen die Anwendung der W-Filter Matrix  $w_{r,l}$  auf die Referenzsignale  $x_r$  zur Berechnung der Lautsprecher-ausgangssignale  $y_l$  im Vorwärtszweig zwecks Latenz-minimierung im Zeitbereich erfolgen, zum anderen muss der Updatezweig, bei der die spektralen Referenzsignale  $X_r$  und Fehlersignale  $E_m$  unter Einbeziehung der geschätzten Übertragungspfade der Sekundärstrecken im FxLMS Algorithmus zum iterativen W-Filter Update verwendet werden, im Spektralbereich berechnet werden, um den Rechenaufwand auf ein vertretbares Maß zu reduzieren [5].

## System-Latenz

Für die Latenzbetrachtung insgesamt, spielt die Latenz des ARNC-Systems eine entscheidende Rolle [6]. Da nur hier, durch eine geeignete Auswahl der elektronischen Komponenten und Methoden der Signalverarbeitung,

Einfluss auf die Einhaltung des Kausalitätskriteriums genommen werden kann. Alle anderen Komponenten sind in der Latenz nicht mehr zu verändern, da eine Änderung nur durch strukturelle Modifikationen am Fahrzeug zu realisieren wären. Die Latenz im ARNC-System  $\Delta t_{ARNC-Sys}$  lässt sich anhand des sogenannten Vorwärtszweigs bestimmen, in Abbildung 2 ist dieser Pfad rot markiert. In den Gleichungen (1), (2) und (3) ist die jeweilige dazu beitragende Einzelkomponente und deren Latenz aufgeschlüsselt, im Einzelnen die Latenz im Referenzsensor  $\Delta t_X$ , die Latenz im Prozessor  $\Delta t_{Proc}$  zur Anwendung der W-Filter und die Latenz zur Erzeugung des Ausgangssignals am Lautsprecher  $\Delta t_Y$ .

$$\Delta t_X = \Delta t_{X-ADC} + \Delta t_{X-Sig.-Cond.} + \Delta t_{X-Bus-Transport} \quad (1)$$

Unter der Annahme, dass es sich um einen digitalen Sensor handelt, muss für den Sensor nicht nur die ADC Latenz  $\Delta t_{X-ADC}$  berücksichtigt werden, sondern auch Verzögerungen basierend auf Signalaufbereitung  $\Delta t_{X-Sig.-Cond.}$  und Verzögerungen des Datentransports mittels digitalem Bus-Systems  $\Delta t_{X-Bus-Transport}$ .

$$\Delta t_{Proc.} = \Delta t_{X-Buf.} + \Delta t_{X-A.A.F.} + \Delta t_{Y-A.A.F.} + \Delta t_{Y-Buf} \quad (2)$$

Im Prozessor ist die FIR-Filter Berechnung zur Realisierung der W-Filter Matrix latenzfrei, jedoch kann man annehmen, dass die zugrundeliegende ARNC-Abtastrate viel geringer ist, als die Audio Abtastrate. Daher müssen Anti-Alias Filter sowohl am Referenzeingangssignal zur Dezimation, als auch am Lautsprecherausgangssignal zur Interpolation verwendet werden, die auch eine signifikante Latenz aufweisen,  $\Delta t_{X-A.A.F.}$  und  $\Delta t_{Y-A.A.F.}$ . Darüber hinaus hat der Prozessor eine typische Strategie zur Pufferung seiner digitalen Ein- und Ausgänge,  $\Delta t_{X-Buf.}$  und  $\Delta t_{Y-Buf.}$ , diese müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

$$\Delta t_Y = \Delta t_{Y-DAC} + \Delta t_{Y-Amp.} + \Delta t_{Y-Spk.} \quad (3)$$

Das Prozessorausgangssignal muss in Schall umgewandelt werden, dazu muss zuerst das digitale Signal per DAC  $\Delta t_{Y-DAC}$  in ein analoges Signal gewandelt werden, danach kommt typischerweise ein Verstärker, der seinerseits eine Latenz  $\Delta t_{Y-Amp.}$  mit sich bringt, und zuletzt der elektromagnetische Lautsprecher, dessen Tiefpassfiltercharakteristik ebenfalls eine Signalverzögerung  $\Delta t_{Y-Spk.}$  verursacht.

$$\Delta t_{ARNC-Sys.} = \Delta t_X + \Delta t_{Proc.} + \Delta t_Y \quad (4)$$

In Summe bildet sich die ARNC-System Gesamtlatenz, siehe Gleichung (4).

### Kausalitätskriterium

Als ARNC Kausalitätskriterium gilt allgemein, dass die Latenz im ARNC-System und im Sekundärpfad zusammen die Latenz im Primärpfad nicht überschreiten darf, siehe Gleichung (5), um eine echte Kausalität zu gewährleisten.

$$\Delta t_{Primary-Path} > \Delta t_{ARNC} + \Delta t_{Secondary-Path} \quad (5)$$

Unter Berücksichtigung der im Fahrzeug verwendeten Verteilung der Referenzsensoren, Fehlermikrofone und

Lautsprecher (Aktuatoren) lassen sich für jede Paarung von Primärstrecken  $s_{r,m}$  und Sekundärstrecken  $s_{l,m}$  unter Berücksichtigung von Gleichung (5) die Kausalitätskriterien anhand Gleichung (6) erweitern.

$$\Delta t_{s_{r,m}} > \Delta t_{ARNC} + \Delta t_{s_{l,m}} \quad (6)$$

In der Praxis kann es vorkommen, dass nicht alle Paarungen dieses Kriterium erfüllen, es können aber, in bestimmten Konstellationen und bei entsprechender Controller-Dimensionierung, die zu erwarteten Leistungseinbußen minimiert werden [7]. Daher ist es sinnvoll eine genauere Kausalitätsuntersuchung durchzuführen, um im Vorfeld schon möglichst genaue Latenzinformationen über die verwendeten Paarungen zu erhalten. Betrachtet man die Komponentenverteilung in Abbildung 3, so ist es aufgrund der geometrischen Lage sehr naheliegend, dass z.B. die Paarung  $\{p_{1x,4}, s_{4,4}\}$  mit höherer Wahrscheinlichkeit das Kausalitätskriterium erfüllen kann als im Vergleich dazu die Paarung  $\{p_{1x,1}, s_{4,1}\}$ .

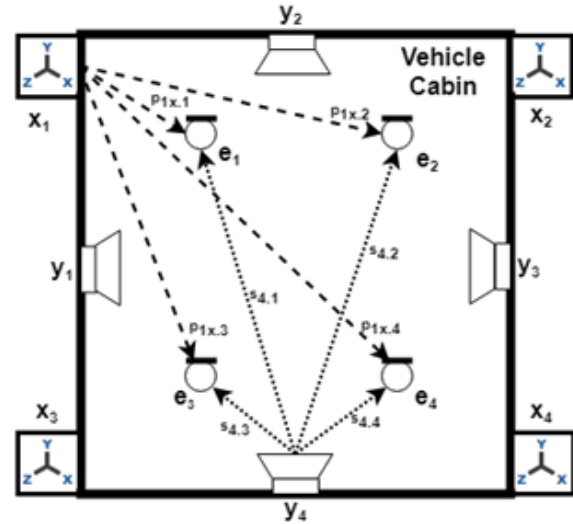


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Fahrzeugkabine mit beispielhafter Verteilung von 3-achsigen (x/y/z) B-Sensoren  $x_{1..4}$ , Fehlermikrofone  $e_{1..4}$  und Lautsprecher  $y_{1..4}$ , zur Veranschaulichung der möglichen Primär- und Sekundärpfad-Paarungen  $\{p_{r,m}, s_{l,m}\}$ .

Die Latenz im Sekundärpfad kann auf die Wegstrecke  $\Delta d_s$ , die der Direktschall vom Lautsprecher zum Fehlermikrofon benötigt, zurückgeführt werden, siehe Gleichung (7).

$$\Delta d_{s_{l,m}} = c_{air} \cdot \Delta t_{s_{l,m}}, \text{ mit } c_{air,9=20^\circ C} = 343 \frac{[m]}{[s]} \quad (7)$$

Nimmt man an, dass die Betriebstemperatur im Fahrzeug im Mittel um 20°C liegt, so kann durch einfache Abstandsmessung zwischen Systemlautsprecher und Fehlermikrofon die Latenz im Sekundärpfad berechnet werden. Die Tabelle 1 zeigt für typische Abstände in Personenfahrzeugen die jeweilige Latenz im Sekundärpfad.

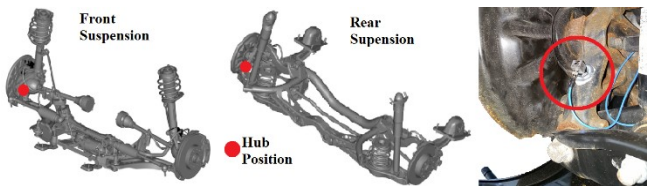
Tabelle 1: Latenz im Sekundärpfad nach Abstand

Sekundär Strecken	Abstand			
	0.1 [m]	0.5 [m]	1.0 [m]	1.5 [m]
Latenz	0.3 [ms]	1.5 [ms]	2.9 [ms]	4.4 [ms]

Da der Abstand zwischen Lautsprecher und geplanter Position des Fehlermikrofons ermittelt werden kann, lässt sich die Latenz für die jeweiligen Sekundärpfad-Paarung berechnen. Für die Latenzbestimmung im Primärpfad gibt es ebenfalls Überlegungen, diese analytisch zu berechnen [6]. Im Gegensatz zum einfachen Zusammenhang zwischen Abstand und Latenz in der Akustik, wie sie für Latenzabschätzungen im Sekundärpfad zur Anwendung kommen, ist ein derartiger Ansatz ohne Kenntnisse der Struktur und ohne vorheriger ausführlicher Transfer-Pfad-Analyse (TPA) für den Primärpfad nur bedingt einsetzbar. Daher erfolgt hier die Bestimmung der Latenz im Primärpfad messtechnisch mittels Hammer-Test, da dieser eine möglichst einfache Methode zur Latenzbestimmung darstellt.

## Hammer-Test

Zu diesem Zweck wurde ein einfacher Hammer-Test an einem PKW der Kompaktklasse durchgeführt. Durch einen kräftigen Hammerschlag mittels mittelschwerem Fäustel lotrecht zum Reifenlaufstreifen wird eine Anregung der Strasse simuliert, wobei das Fahrzeug für die Messungen freistehend und verschlossen abgestellt wurde. Für den Messaufbau wurde je ein dreiachsiger B-Sensor an jeder Radnabe geklebt, wobei die Y-Sensorrichtung in Richtung der Fahrzeugquerachse gelegt wurde, siehe Abbildung 4, und im Fahrzeuginnenraum wurde an jeder Kopfstütze auf Höhe der äußeren Ohrposition je ein Messmikrofon installiert. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Kohärenzerkenntnisse aus einer umfangreichen ARNC Studie vorliegen, greift man aus zweierlei Gründen auf die Positionen an den Radnaben zurück. Zum einen werden dort, im Gegensatz zu anderen Position am Chassis, Vibrationen im ARNC relevanten Spektralbereich zwischen 20 [Hz] und 250 [Hz] mit relativ hohen Beschleunigungswerten gemessen und zum anderen ermöglichen diese Positionen die größtmögliche Latenz im Primärpfad, weil die Sensoren möglichst nahe am Reifen liegen und daher die Signale den weitesten Weg durch die Struktur zurücklegen müssen.

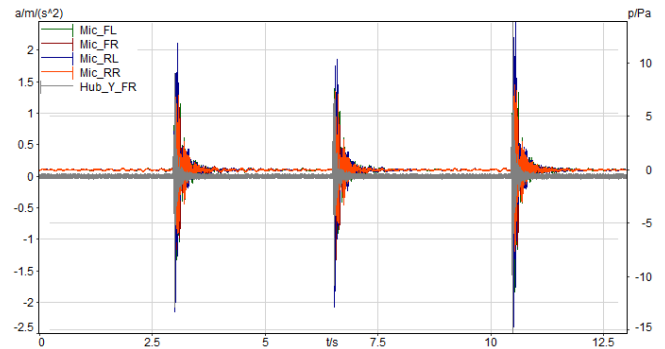


**Abbildung 4:** Links: Schematische Darstellung der vorderen und hinteren Achse eines PKWs der Kompaktklasse mit eingezeichneten B-Sensorpositionen an den Radnaben. Rechts: Dreiachsiger B-Sensor montiert am Radträger hinten links.

## Messergebnisse

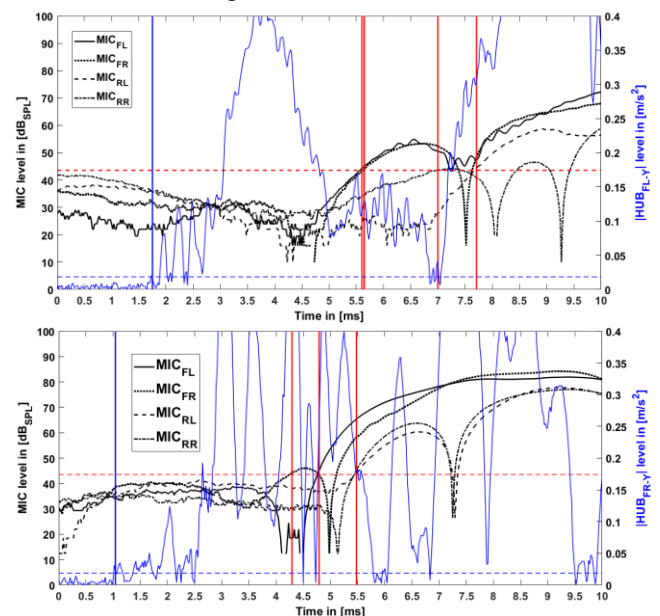
Pro Reifen wurden jeweils zwei Aufnahmen mit je drei Schlägen im Abstand von ca. drei Sekunden gemacht, siehe Abbildung 5. Diese Pausen zwischen den Schlägen sorgen für eine ausreichende Abklingzeit nach jedem Schlag. Die Aufnahmen zeigen in den ersten vier Kanälen immer die Mikrofonpegel ( $MIC_{FL}$ ,  $MIC_{FR}$ ,  $MIC_{RL}$  und  $MIC_{RR}$ ) und im fünften Kanal die entsprechenden B-Sensoren in Richtung der Y-Achse ( $HUB_{FL-Y}$ ,  $HUB_{FR-Y}$ ,  $HUB_{RL-Y}$  und  $HUB_{RR-Y}$ ). Somit stehen je Radnabenposition insgesamt sechs Messungen zur Verfügung. Zur Latenzermittlung, siehe Abbildungen 6, wurde für die Mikrofonpegel ein

Geräuschpegel von ca. 43 [dB<sub>SPL</sub>] als Schwellwert definiert, der knapp über dem allgemeinen Rauschpegel während der Messung liegt, und somit als Trigger-Punkt (rote vertikale Linien) für die Pegelanstiegserkennung dient.



**Abbildung 5:** Synchrone Hammer-Test Messung des vorderen rechten Radnaben B-Sensors ( $HUB_{FR-y}$ ) und von vier Mikrofone an den jeweiligen Kopfstützen für drei aufeinanderfolgende Schläge auf die Reifenlauffläche mit Pausen von je ca. drei Sekunden.

Ebenso wurde auch für das B-Sensor Betragssignal ein Schwellwert ermittelt, so dass auch hier der Trigger-Punkt gemessen werden kann (vertikale blaue Line). Aus der zeitlichen Differenz der B-Sensor- und Mikrofon-Trigger-Punkte lässt sich die jeweilige Signallaufzeit ableiten, im Anschluss werden dann die einzelnen gemessenen Signallaufzeiten über die Messungen gemittelt und in Tabelle 2 zusammengefasst.



**Abbildung 6:** Graphische Darstellung der Bulk-Delay-Messung (oben  $HUB_{FL-y}$  und unten  $HUB_{FR-y}$ ) mit jeweiliger Gegenüberstellung der Impulsantworten als Schallpegel für die Mikrofone und als absolute Werte für den B-Sensor.

Man kann erkennen, dass die jeweiligen zum B-Sensor geometrisch am nächsten gelegenen Messmikrofone, in Tabelle 2 gelb markiert, zuerst auf den Hammerschlagimpuls reagieren, gefolgt von den anderen jeweils weiter entfernt liegenden Messmikrofone. Unterstellt man eine Latenz des ARNC-Systems von 1.3 [ms] und Verzögerungen von 2.9

[ms] in der Sekundärstrecke, so sind alle in Tabelle 2 grün hervorgehoben Sensor-Mikrofon-Paarungen echt kausal, weil der Primärpfad laut Kausalitätskriterium mindestens eine Latenz von 4.2 [ms] aufweisen muss.

**Tabelle 2:** Latenz im Primärpfad mittels Hammer-Test

Primär Strecken	Radnabe (Y-Richtung)			
	HUB <sub>FL</sub>	HUB <sub>FR</sub>	HUB <sub>RL</sub>	HUB <sub>RR</sub>
MIC <sub>FL</sub>	3,9 [ms]	3,8 [ms]	6,1 [ms]	4,4 [ms]
MIC <sub>FR</sub>	3,9 [ms]	3,3 [ms]	5,9 [ms]	6,3 [ms]
MIC <sub>RL</sub>	6,0 [ms]	4,4 [ms]	3,8 [ms]	3,0 [ms]
MIC <sub>RR</sub>	5,3 [ms]	4,4 [ms]	3,9 [ms]	3,3 [ms]

## Diskussion und Zusammenfassung

Somit erfüllen die Paarungen der B-Sensoren auf der vorderen Achse zu den Mikrofonen auf der hinteren Sitzreihe und umgekehrt das Kausalitätskriterium. Für Fahrzeuge dieser Klasse und Achsstruktur ist dies eine typische Verteilung. Insbesondere die Primärpfad-Paarungen von B-Sensoren auf der hinteren Achse und die Mikrofone zum Fahrer und Beifahrer weisen eine Latenzreserve von ca. 1-2 [ms] auf. Unter der Annahme, dass die dominanten und strukturbasierten Rollgeräusche über die Hinterachse in den Innenraum eingekoppelt werden, müsste sich ein ARNC-System mit gut hörbarer Dämpfung insbesondere für den Fahrer und Beifahrerplatz realisieren lassen. Für diesen Fall macht es Sinn weiterführende intensivere Untersuchungen anzustellen, auch wenn es bei dieser einfachen visuellen Messmethode zu relativ großen Messfehlern und Abweichungen von bis zu  $\pm 0.5$  [ms] kommen kann. Den trotz einfachem Testablaufs ist es nicht selbstverständlich saubere Messungen zu erhalten, da der Hammerkopf flach auf das Reifenprofil treffen muss und beim Aufschlag nicht an den Profilrillen abkanten darf. Ein wesentlicher Nachteil der beschriebenen Ablesemethode liegt bei der richtigen Wahl der Mikrofon-Trigger-Schwelle. Für unterschiedliche Trigger-Level werden auch unterschiedliche Latenzzeiten ermittelt, welche dann zu einer ungenauen Messmethode führt. Obwohl der Hammerschlag im B-Sensor an der Radnabe noch recht leicht und eindeutig erkennbar ist, so ist dies bei den Mikrofonaufnahmen viel schwieriger zu erkennen. Hier ist es unklar, ob es sich um den ersten dominanten Impuls handelt, oder aber ein Ausschlag aufgrund einer schnell ausbreitenden aber schwachen Longitudinalwelle detektiert wird [8]. Aufgrund diverser Welleneffekte, wie der Dispersion der Wellen in der Struktur, die Superposition der Pulse durch diverse dominante Pfade oder die Reflexion und Transmission zwischen den Strukturelementen, sind klassische Latenzschätzverfahren (TDE), wie Kreuzkorrelation oder Superpositionsverfahren [9], nicht möglich bzw. ergeben kein eindeutiges Ergebnis. Trotz aller diskutierten Nachteile kann mit Hilfe von einfachen Hammer-Tests eine Kausalitätsprüfung erfolgen, wenn die gemessene Latenz im Primärpfad abzüglich einer großzügigen Messtoleranz von einer Millisekunde immer noch größer ist als die Latenz des ARNC-Systems zusammen mit der Latenz einer eher

nachteiligen Paarung in der Sekundärstrecke. Auch knappe Ergebnisse in einem derartigen Kausalitäts-Check können hilfreiche Hinweise auf mögliche ECU Architekturen und Anforderungen an den ARNC-Kontroller und evtl. nachgeschaltete Verstärker geben. Ein großer Vorteil des Hammertests liegt in seiner praktischen Durchführbarkeit innerhalb eines halben Arbeitstages. Dieser Vorteil wäre auch bei einem inversen also einem reziproken Analyseverfahren für den Primärpfad gegeben [10]. Eine derartige Messmethode hätte den Vorteil, im Gegenteil zum Hammertest, dass praktisch keine Verfälschung der Messergebnisse durch Übertragung im Luftschall möglich ist.

## Literatur

- [1] Zeller, P. (2009). Handbuch Fahrzeugakustik (1st Edition ed.). Vieweg+Teubner.
- [2] Zafeiropoulos, N., Moorhouse, A., Ballatore, M., Mackay, A., (2015), Active control of road noise: The relation between the reference sensor location and the effect on the controller's performance. Proceedings in 22nd International Congress of Sound and Vibration.
- [3] Kuo, S. M., Morgan, D. R. (1996). Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations. John Wiley & Sohns, Inc.
- [4] Zafeiropoulos, N., Zollner, J., Kandade Rajan, V. (2018). Active Road Noise Cancellation for the Improvement of Sound Quality in the Vehicle. ATZ worldwide 120.
- [5] Zollner, J., Zafeiropoulos, N., Christoph, M., Kandade Rajan, V. (2017). Active Road Noise Cancellation: Off-the-Shelf Digital Audio Amplifier Platform. 2017 AES International Conference on Automotive Audio. Audio Engineering Society.
- [6] Sutton, T., Elliott, S., McDonald, M., Saunders T. (1994). Active control of road noise inside vehicles. Noise Control Engineering Journal 42.
- [7] Burdisso, R., Viperman, J., R. Fuller, C. (1993). Causality analysis of feedforward-controlled systems with broadband inputs. Acoustical Society of America Journal. 94.
- [8] Kohlhuber, M. (2012). Ausbreitung elastischer Wellen in komplexen dünnwandigen Strukturen. University Halle. URL: <http://digital.bibliothek.uni-halle.de/hs/urn/urn:nbn:de:gbv:3:4-8175>
- [9] Dudacek, K. (2015). Short Time Delay Measurement. Technical Report No. DCSE/TR-2015-03. URL: <http://www.kiv.zcu.cz/publications/>
- [10] Pauwels, S., Michel, J., Robijns, M., Peeters, B., Debillé, J. (2006). A new MIMO Sine Testing Technique Accelerated High Quality FRF measurements. Proceedings of XXIV IMAC Conference.