

## Akustische Funktionsmehrung elektrischer Lenksysteme,

## Teil 1: Experimentelle Validierung im Fahrzeug

Robert Henneberger<sup>1</sup>, Florian Schaschko<sup>1</sup>, Simon Hecker<sup>1</sup>,  
Stefan Sentpali<sup>1</sup>, Stefan Schubert<sup>2</sup>, Martin Meyer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hochschule München, 80939 München, Email: robert.henneberger@hm.edu

<sup>2</sup> BMW AG, 80788 München, Email: Stefan.SB.Schubert@bmw.de

<sup>3</sup> thyssenkrupp steering AG, 9492 Eschen (FL), Email: martin.meyer2@thyssenkrupp.com

## Motivation

Um elektrische Maschinen, die im Fahrzeug verbaut sind, effektiver nutzen zu können, wurde eine akustische Funktionsmehrung dargestellt. Hierbei ist beispielhaft ein elektrisches Lenksystem (als Ergebnis einer Entwicklung mit BMW und thyssenkrupp) mit achsparallelen Antrieb (R-EPS) so modifiziert worden, dass die radiale Magnetfeld Komponente des Motors zur Erzeugung von Vibrationen genutzt werden können. Ziel ist es hierbei, keinen Einfluss auf die rotatorische Performance des Motors zu nehmen. Die regelungsstechnischen Grundlagen hierfür können in [1] nachgelesen werden. Die echtzeitfähige Funktionsintegration auf einem Mikrocontroller und der EPS ECU sind in [2] zu finden. Im folgenden wird ein messtechnischer Befund der vibroakustischen Eigenschaften der neuen Akustikfunktion präsentiert.

## Messaufbau

Für die vibroakustische Untersuchungen wurde zu den bereits integrierten Reglerstrukturen (vgl. Abbildung 1, schwarze Blöcke) ein Messfrontend der Firma Müller BBM installiert. Zu den üblichen Luft- und Körperschallsensoren wurde ein privater CAN Bus eingerichtet. Dieser dient dem Datenaustausch mit der DSpace Autobox. Der private Flexray dient der Kommunikation zwischen Autobox und der EPS ECU (vgl. [2]).

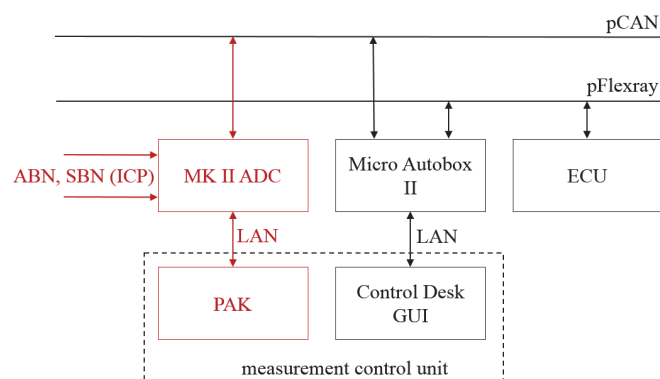


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus. Rot gekennzeichnet, die Erweiterung für vibroakustische Untersuchung.

## operationelle Transferpfadanalyse (oTPA)

Um die Körper- und Luftschallpfade qualitativ beschreiben zu können, wurde hierfür eine oTPA durch-

geführt. Diese bietet gegenüber der klassischen TPA den Vorteil, dass die tatsächlichen, im Betrieb vorkommenden, radialen Magnetfeld Kräfte direkt als Anregungsquelle verrechnet werden können. Die für die oTPA benötigten Transferfunktionen wurden mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse von Kanalübersprechen bereinigt (92% PC). Um eine möglichst hohe Kohärenz im kompletten Arbeitsfrequenzbereich zu erzielen, wurden für die Übertragungsfunktionsberechnung eine große Menge an parametervariierten Betriebsmessungen genutzt. In Abbildung. 2 wird zunächst die Frage beantwortet, ob und in welchem Maße, Körper- (KS) und Luftschallanteile (LS) von der EPS dominante Beiträge im Bezug zum Emissionsort (Luftschall Fahrerrohr innen) liefern. Die rote Kurve repräsentiert die Körperschallanteile der EPS (Beschleunigung auf der Gehäuseoberfläche). Deutlich zu erkennen ist, dass dieser Beitrag über den betrachteten Frequenzbereich dominierend ist. Im Vergleich leistet der reine LS-LS Übertragungspfad nur einen geringen Beitrag. Die gute Übereinstimmung der grauen und schwarzen Kurve zeigt, dass für die Transferpfad Synthese (TPS) ein ausreichend genaues Netzwerk erstellt wurde. Es sind somit keine signifikanten Quellen außer acht gelassen worden.

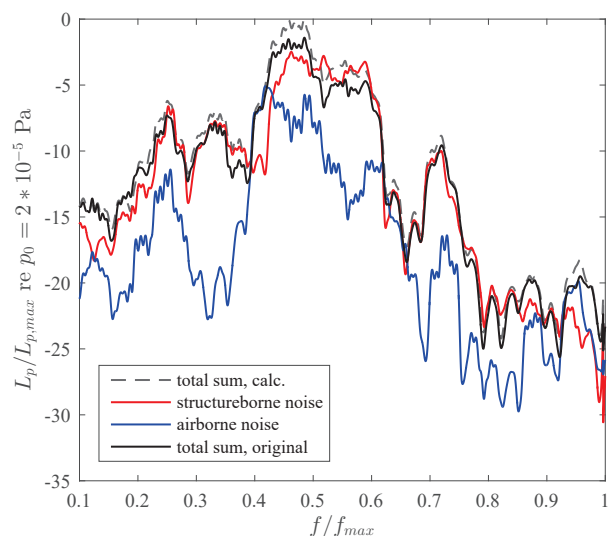
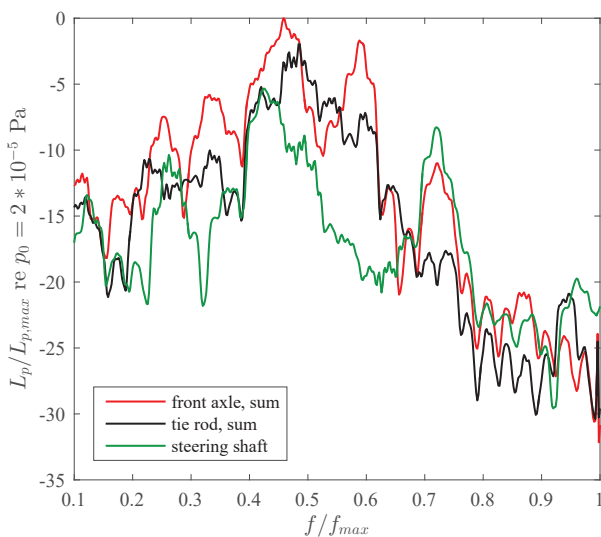


Abbildung 2: normierte Beiträge zum A-bewertete Schalldruckpegel Fahrerrohr innen. Original Messung (schwarz), Berechneter Gesamtpegel aus TPS (grau), Körperschallanteil (rot), Luftschallanteil (blau)

Nachdem die KS-LS Übertragung als signifikanter Schallpfad erkannt wurden, stellte sich die Frage, an welchen Lenkungsanbindungen die für den Fahrer signifikanteste KS Energie in die Karosserie eingeleitet wird. Zur Beantwortung dieser Frage wurde wieder eine oT-PA durchgeführt. Diesmal wurden hierbei alle KS Anbindungspunkte der Lenkung (Vorderachsträger, Spurstangen und Lenkwelle) als Quellen angenommen. Zielgröße war wieder der LS am Fahrerohr. Das System wurde ebenfalls mit der neuen Akustikfunktion direkt durch die Magnetkräfte der EPS angeregt. In Abbildung 3 sind die Ergebnisse dieser Analyse abgebildet. Zu sehen sind die Anteile der beschriebenen Anbindungspunkte zum LS Fahrerohr. Bis ca.  $0,7 f/f_{max}$  ist der KS Beitrag über die Vorderachsträgeranbindung dominierend. Ab ca.  $0,7 f/f_{max}$  nimmt der Beitrag über die Lenkwellenanbindung zu. Die Messergebnisse entsprechen dem subjektiven raumfüllenden Höreindruck der Akustikfunktion im Innenraum.

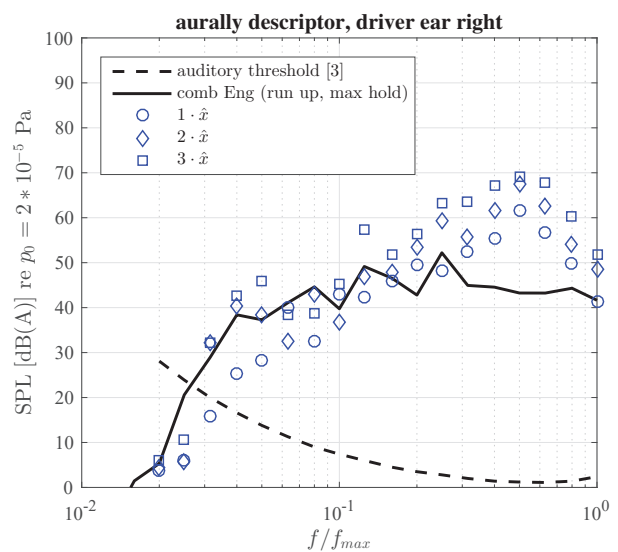


**Abbildung 3:** normierte Beiträge zum A-bewertete Schalldruckpegel Fahrerohr innen. Summe Vorderachsträgeranbindungspunkte (rot), Summe Spurstangen (schwarz), Lenkwelle (grün).

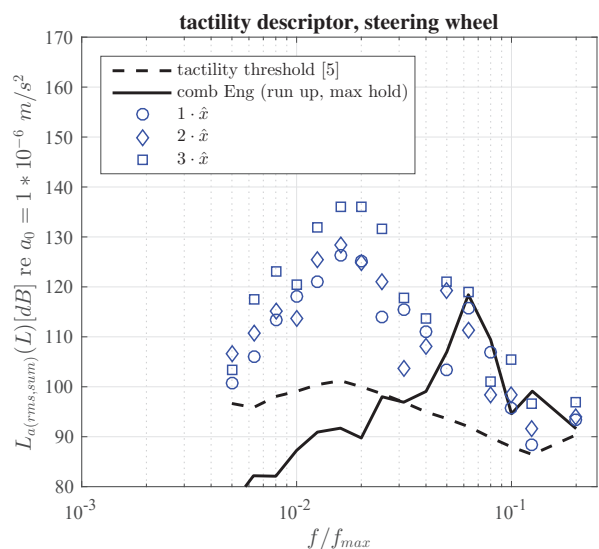
## Sensorische Wahrnehmung im Innenraum

Im folgenden Abschnitt ist die Wahrnehmung im Innenraum bzw. die MMI genauer untersucht worden. Hierbei wird die Betrachtung auf das auditive Moment (LS Fahrerohr) und das taktile Moment (Lenkradvibrationen) eingegrenzt. In Abbildung 4 sind A-bewertete max hold Schalldruckpegel für 3 verschiedene Amplituden dargestellt. Diese repräsentieren den Arbeitsbereich für Luftschallemission. Die gestrichelte Kurve ist die A-bewertete 0 Pohn Kurve. Diese stellt entsprechend [3] ein grobes Maß für die Hörschwelle des Menschen dar. Die Akustikfunktion ist ab  $0,03 f/f_{max}$  deutlich wahrnehmbar. Als Maß für einen realen Störpegel dienen max hold Terzpegel des Verbrennerhochlaufs (schwarze Linie). Unter Einbeziehung dieser Störgröße, liegt die Wahrnehmungsgrenze für ASD Anwendungen bei ca.  $0,15 f/f_{max}$ .

Die gleiche Untersuchung wurde für das taktile Moment (Lenkradvibrationen, 12 Uhr Position) durchgeführt. In Abbildung 5 ist der Beschleunigungspegel entsprechend der dreiaxigen Einpunktmessung vektoriell gemittelt (Bewertungsfaktoren wurden nach [4] zu 1 gesetzt). Die Beschleunigungswerte wurden zudem mit der frequenzabhängigen Filterfunktion  $W_L$  gewichtet (vgl. [4]). Als Maß für die Perzeptionsschwelle wird sich in dieser Arbeit auf die Untersuchungen von [5] bezogen. Auch hier wird ersichtlich, dass die Vibrationen am Lenkrad deutlich wahrnehmbar sind. Als Störgröße wurde ebenfalls ein Motorhochlauf angenommen (schwarze Linie). Die Akustikfunktion ist bis ca.  $0,05 f/f_{max}$  spürbar, bevor sie von Resonanzeffekten der Lenkung maskiert wird.



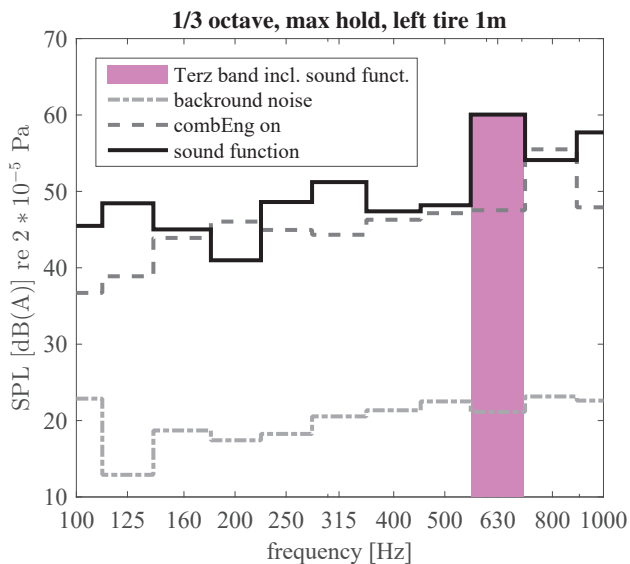
**Abbildung 4:** normierter A-bewertete Terzpegel Fahrerohr innen für verschiedene Amplituden (blau), Perzeptionsschwelle A-bewertet nach [3](- - -), Störpegel Motorhochlauf (max hold) (—).



**Abbildung 5:** normierter L-bewertete Terzpegel Beschleunigung am Lenkrad für verschiedene Amplituden (blau), Perzeptionsschwelle nach [5] (- - -), Störpegel Motorhochlauf (max hold) (—).

## Wahrnehmung im Außenbereich

In Abbildung 6 ist der Luftschall Terzpegel, gemessen auf schallharten Untergrund 1 m neben dem linken Vorderrad auf Höhe der Radnabe abgebildet. Die pinkfarbenen markierte Terz beinhaltet das für diese Messung zugrundeliegende Anregungssignal. Ein SNR von ca. 15 dB zur Störgröße (Verbrenner) ist ohne Betrachtung etwaiger Impuls-, Tonzuschläge oder Maskierungseffekte deutlich wahrnehmbar. Es stammen keine zusätzlichen Geräuschbeiträge aus Lenkaktionen.



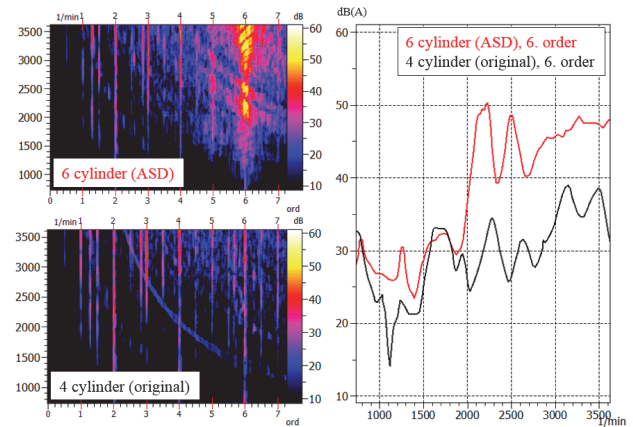
**Abbildung 6:** A-bewertete Terzpegel 1 m neben dem linken Vorderrad auf Höhe der Radnabe und schallhartem Untergrund (schwarz), Störpegel Verbrenner (- - -), Störpegel Messlabor (- - - -), Testsignal beinhaltende Terz (pink)

## Beispiel für mögliche ASD Funktionen

Im Vergleich der beiden Ordnungsspektren in Abbildung 7, ist oben links deutlich eine synthetische 6. Ordnung (Nachbildung eines Reihen Sechszylinder) zu sehen. Die Ordnung wird in Echtzeit auf Basis der Drehzahlinformationen vom Fahrzeug CAN berechnet. Details zur Umsetzung finden sich in [2]. Die Gegenüberstellung der Ordnungspegel (Abbildung 7 rechts) zeigen deutlich die ASD Möglichkeiten für den Luftschall am Fahrerohr. Der Pegelsprung im Bereich 2000 rpm wurde mit einer zusätzlichen Filterfunktion erreicht. Diese erlaubt es die ASD Funktion drehzahlabhängig zu gewichten.

## Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die aus [1] und [2] beschriebenen Grundlagen der radial ausgerichteten Schwingungserzeugung in PMSM vibroakustisch untersucht. Es wurde festgestellt, dass der Körperschallanteil der Akustikfunktion der signifikante Beitragsleister zum Luftschall am Fahrerohr ist. Außerdem wurde gezeigt, dass der Körperschalleintrag bis ca.  $0,7 f/f_{max}$  hauptsächlich über den Vorderachsträger geschieht. Weiterhin wurde dargestellt, dass die Zusatzfunktion im Bezug auf das auditive und taktile Moment im Fahr-



**Abbildung 7:** A-bewerteter Schalldruckpegel Fahrerohr innen. links unten: Ordnungsdiagramm Verbrenner Hochlauf original, links oben: Ordnungsdiagramm Verbrenner Hochlauf modifiziert (6. Ordnung), rechts: Ordnungspegel 6. Ordnung original (schwarz), modifiziert (rot)

zeuginnenraum deutlich wahrnehmbar ist und auch unter Störgrößeneinfluss dominant ist. Lenkradvibrationen sind bis ca.  $0,05 f/f_{max}$  und der Luftschall ab ca.  $0,15 f/f_{max}$  wahrnehmbar. Es wurde anhand eines 600 Hz Signals festgestellt, dass die Funktion mit einem SNR von ca. 15 dB zum Verbrennerpegel im Außenbereich nicht maskiert wird. Abschließend wurde am Beispiele einer 6. Ordnung des Verbrennungsmotors die Möglichkeiten von ASD veranschaulicht. In Zukunft wird die intermodalen Wahrnehmung weiter untersucht.

## Anerkennung

Diese Arbeit entstand in enger Zusammenarbeit mit BMW und Thyssenkrupp Presta. Ich möchte mich für die gute Zusammenarbeit bei Stefan Schubert, Martin Meyer und Dezsó Bakos bedanken. Für die Unterstützung im Labor für Akustik und Dynamik an der Hochschule München danke ich Fabian Ebner, Marcus Baecker und Anian Brosch.

## Literatur

- [1] Hecker, S. et al., Akustische Funktionsmehrung elektrischer Lenksysteme, Teil 1: Möglichkeiten und Umsetzung mit Hilfe des E-Motors, DAGA 2016 Aachen
- [2] Schaschko, F. et al., Akustische Funktionsmehrung elektrischer Lenksysteme, Teil 2: Aufbau einer prototypischen Steuerkette für eine Sound Design-Funktion im Kraftfahrzeug, DAGA 2016 Aachen
- [3] DIN ISO 226:2006-04: Teil 7, Bezugshörschwellen unter Freifeld- und Diffusfeldbedingungen, Beuth Verlag, 2006
- [4] VDI 2057-2, Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen Hand-Arm-Schwingungen, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, 2012
- [5] Morioka, M., Perception thresholds for vertical steering wheel, vibration, 38th United Kingdom Conference on Human Response to Vibration, 2003, S. 3545