

Äquivalente Kräfte und deren numerische Verwendung im Gesamtfahrzeugkontext

Dimitrios Ernst Tsokaktsidis¹, Christoph Grünert¹ und Steffen Marburg²

¹ Daimler AG, 71059 Sindelfingen, Deutschland, E-Mail: dimitrios_ernst.tsokaktsidis@daimler.com

² Technische Universität München, Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme, 85748 Garching b. München

Einleitung

Der Produktentstehungsprozess von Fahrzeugkomponenten enthält einen beachtlichen Anteil an experimentellen Untersuchungen. Vor dem Hintergrund der Kosten- und Zeiterparnis wird dieser reduziert. Abhängig von dem zu betrachtenden Frequenzbereich, der Komplexität und den Systemgrenzen werden verschiedene numerische Bewertungsmethoden eingesetzt [1]. Zur Systemmodellierung haben sich in der Automobilindustrie die Mehrkörpersimulation, die Methode der finiten Elemente, die Randelementmethode und die Statistische Energieanalyse etabliert. Anstatt der gängigen Methoden wird ein Machine Learning Ansatz verwendet, um den Luftschall im Fahrzeuginnenraum aus Komponenten Kennwerten zu berechnen.

Versuchsseitige Bewertung eines elektromechanischen Lenksystems

Die Bewertung von Fahrzeugkomponenten wird zu einem großen Anteil am Gesamtfahrzeug durchgeführt. Abbildung 1 veranschaulicht die der Bewertung zugrundeliegende Wirkkette am Beispiel eines elektromechanischen Lenksystems. Das Lenkgetriebe leitet die Anregung über dessen Koppelstellen an die Fahrzeugstruktur weiter. Abhängig von ihren vibroakustischen Eigenschaften findet ein Transfer in den Fahrgastraum statt. Als abschließende Bewertungsgröße für die akustische Qualität der Komponente dient der für die Insassen hörbare Luftschall. Dieser wird subjektiv und objektiv evaluiert.

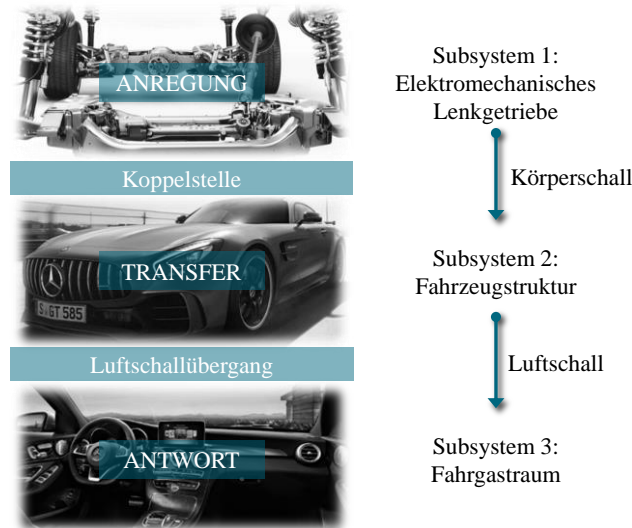


Abbildung 1: Wirkkette zur Bewertung eines elektromechanischen Lenkgetriebes

Als beispielhaftes Phänomen wird das Parkieren betrachtet. Der Fahrer bringt ein Moment am Lenkrad auf und erzeugt

somit eine Lenkbewegung. Diese wird durch den Elektromotor des Lenkgetriebes unterstützt. Je nach Betriebszustand wird ein in Frequenz und Amplitude unterschiedlicher Körperschall erzeugt, der als Luftschall in den Fahrgastraum abgestrahlt wird. Abbildung 2 zeigt ein typisches Testmanöver zur Bewertung einer Lenkung.

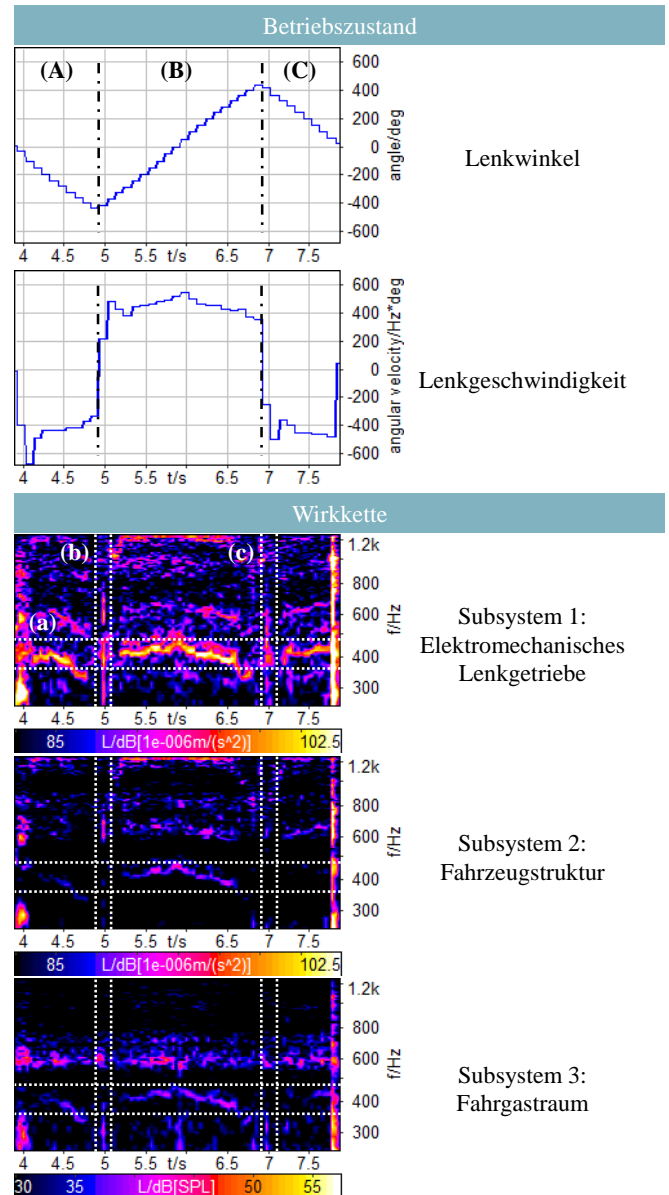


Abbildung 2: Darstellung des Betriebszustandes und der akustischen Wirkkette bei der Durchführung eines typischen Testmanövers zur Bewertung eines elektromechanischen Lenkgetriebes

Von oben nach unten sind der Lenkwinkel, die Lenkgeschwindigkeit, der Körperschall an einer Koppelstelle des Lenkgetriebes, der Körperschall auf der fahrzeugseitigen

Empfängerstruktur und der Luftschall am linken Beifahrerohr dargestellt. Die Körperschallsignale sind in Fahrzeughochrichtung aufgezeichnet. Für den Luftschall wurde ein Kunstkopf verwendet. Der Testzyklus lässt sich in drei Bereiche unterteilen, die zeitlich aufeinander folgen. Lenken aus der Mittelstellung bis kurz vor den linken Endanschlag (A). Lenken bis kurz vor den rechten Endanschlag (B). Lenken zurück in die Mittelstellung (C). Es wird eine konstante Lenkgeschwindigkeit von $400^\circ/s$ innerhalb der Bereiche angestrebt. Während des gesamten Lenkvorganges ist auf dem Lenkgetriebe die dominante Motorordnung des Elektromotors mit einer Frequenz um 400 Hz erkennbar (a). Weiter lassen sich breitbandige Impulse bei beiden Drehrichtungswechseln (b) und (c) beobachten. Nach Übergang auf die Fahrzeugstruktur sind die Amplituden beider Phänomene deutlich verringert. Die Impulse der Richtungswechsel sind im dargestellten Pfad kaum noch ersichtlich. Im Fahrgastraum beschränken sich die einst breitbandigen Impulse auf den Bereich um 300 Hz . Die Motorordnung ist weiterhin über den gesamten Testzyklus im Luftschall zu erkennen.

Aus der betrachteten Wirkkette lässt sich ableiten, dass der für die Bewertung maßgebliche Luftschall ein Produkt aus der Anregung der Komponente und der Übertragungsfunktion zum Beifahrerohr ist. Um eine simulative Beurteilung des Gesamtsystems durchführen zu können, müssen beide Beiträge berücksichtigt werden.

Äquivalente Betriebskräfte zur Quellcharakterisierung

Eine Möglichkeit zur Charakterisierung der Quelle ist die Bestimmung von Betriebskräften an den Koppelstellen in-situ. Die dynamische Beschreibung einer Empfängerstruktur wird genutzt um Betriebskräfte invers zu berechnen. Das Vorgehen wird anhand von Abbildung 3 beschrieben. Dargestellt ist die Untersicht eines Gesamtfahrzeuges. Das Lenkgetriebe (grün) ist an den Koppelstellen ((K1), (K2) und (K3)) mit dem Integralträger (blau) verschraubt. Y_{KR} ist die Akzeleranz von Remote Punkt (R1) zu Koppelstelle (K1). Als Remote Punkt wird eine beliebige Stelle auf der Empfängerstruktur bezeichnet. Die x-Achse verläuft in Fahrzeuginnenrichtung, die y-Achse in Querrichtung und die z-Achse in Hochrichtung.

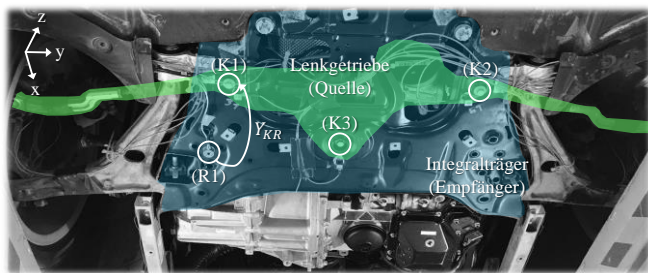


Abbildung 3: Bestimmung äquivalenter Kräfte in-situ an einem Lenkgetriebe

Zur Berechnung der Betriebskräfte an (K1) wird zuerst die frequenzabhängige Übertragungsfunktion Y_{KR} nach Gleichung 1 bestimmt. Die Empfängerstruktur wird dazu an (R1) mit einer Kraft F_R angeregt. Ein auf der Quellstruktur an

(K1) angebrachter Beschleunigungsaufnehmer misst die Antwort a_K .

$$Y_{KR} = \frac{a_K}{F_R} \quad \left[\frac{m}{s^2 N} \right] \quad (1)$$

In einem zweiten Schritt wird nun die Beschleunigung a_R an (R1) während des zu charakterisierenden Manövers aufgezeichnet. Aufgrund der Kenntnis von Y_{KR} lassen sich die äquivalenten Betriebskräfte F_K an (K1) invers über die Beziehung in Gleichung 2 bestimmen.

$$F_K = Y_{KR}^{-1} \cdot a_R \quad [N] \quad (2)$$

[2–5]

Neuronale Netze zur Bestimmung des Luftschalls am Beifahrerohr

Wie an Abbildung 1 beschrieben, ist der Luftschall im Fahrgastraum ein Produkt aus Anregung der Komponente und Übertragungsfunktion zum Beifahrerohr. Um auf numerischem Wege eine Aussage zum Übertragungsverhalten zu treffen, wird ein Regressionsverfahren verwendet. Fünf parallel geschaltete Künstliche Neuronale Netze (KNN) approximieren den Zusammenhang zwischen Komponenten Kennwerten und Luftschall. Alle verwendeten KNN haben einen identischen strukturellen Aufbau mit einer Zwischenschicht (Tabelle 1). Als Aktivierungsfunktion wird in der Zwischenschicht eine sigmoidale Funktion in Form eines Tangens hyperbolicus gewählt. Die Ausgabeschicht ist linear. Es ist somit sichergestellt, dass das Netzwerk jede beliebige, kontinuierliche Funktion approximieren kann [6, 7]. Die Schichten des KNN sind vollvernetzt. Als Backpropagation-Algorithmus wurde die Bayesianische Regularisierung verwendet.

Tabelle 1: Aufbau des KNN

	Eingabeschicht	Zwischenschicht	Ausgabeschicht
Neuronen	9	18	1
Aktivierungsfunktion	-	$f(x) = \tanh(x)$	$f(x) = x$
Bias	-	Ja	Ja

Die Luftschallberechnung erfolgt auf Grundlage der neun translatorischen Freiheitsgrade der Koppelstellen. Abbildung 4 veranschaulicht den Datenfluss. Die Anregung der Koppelstellen wird in Form von Oktavspektren an das System aus KNN übergeben. Dieses berechnet das Luftschallspektrum. Zur Berechnung wird die Anregung in einzelne Oktaven zerlegt. Die blau gefärbte, erste Oktave jedes Freiheitsgrades wird in das oktavzugehörige Sub-KNN übergeben. Für einen bestimmten Zeitblock t_n kann so die Amplitude der ersten Oktave des Luftschalls berechnet werden. Wiederholt man das geschilderte Vorgehen für die Oktaven zwei bis fünf, lässt sich das Spektrum während t_n darstellen.

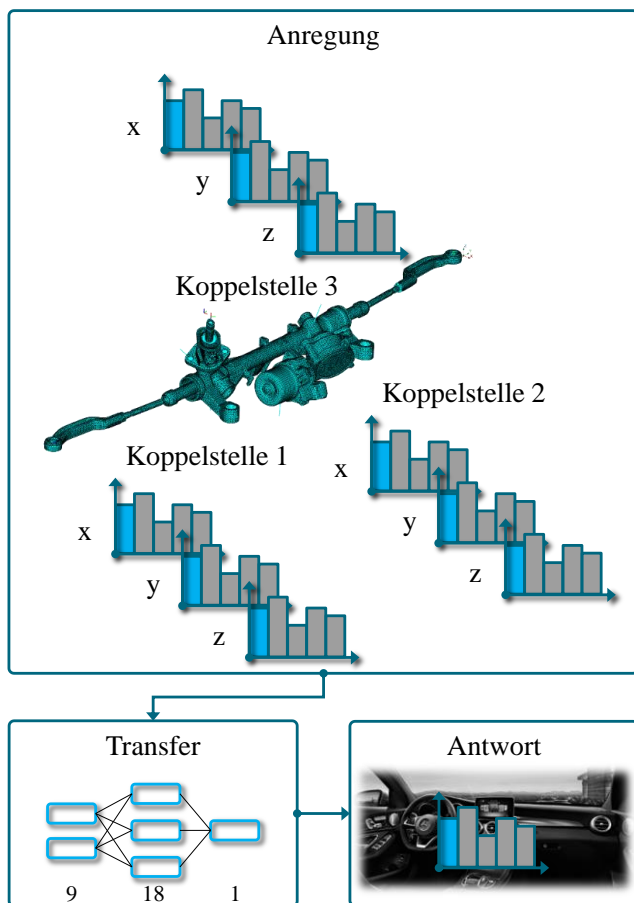


Abbildung 4: Datenfluss zur Luftschallprognose

Die Luftschall-Oktavspektren der Zeitblöcke t_1 bis t_{391} einer Durchlenkmessung sind den berechneten Oktavspektren des KNN in Abbildung 5 gegenübergestellt. In blau der Luftschall aus der Messung, in schwarz die Berechnung des KNN. Die Blocklänge der einzelnen Intervalle der Messung beträgt 4096 Samples.

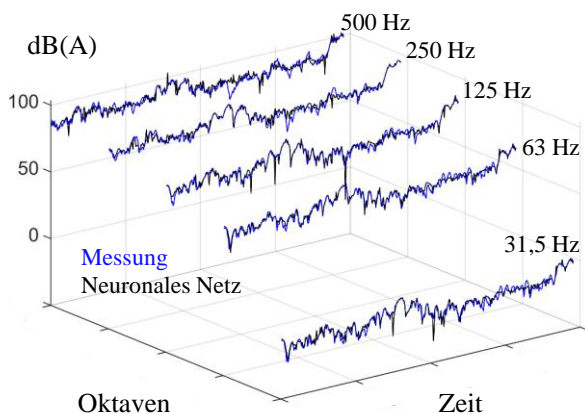


Abbildung 5: Gegenüberstellung Luftschall Beifahrerohr links; Messung (blau), Neuronales Netz (schwarz)

Fazit

Der Luftschall im Fahrzeuginnenraum kann durch ein KNN aus Komponenten Kennwerten berechnet werden. Im vorlie-

genden Artikel wird die Verknüpfung von neun Anregungen auf Strukturebene mit dem Luftschall am linken Beifahrerohr durchgeführt. Das verwendete KNN hat über einen Großteil der Messung die Pfadbeiträge der neun Transferpfade korrekt gewichtet.

Literatur

- [1] P. Zeller, *Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch*, 2nd ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [2] A. S. Elliott, A. T. Moorhouse, T. Huntley, and S. Tate, "In-situ source path contribution analysis of structure borne road noise," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 332, no. 24, pp. 6276–6295, 2013.
- [3] M. V. van der Seijs, D. de Klerk, and D. J. Rixen, "General framework for transfer path analysis: History, theory and classification of techniques," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 68-69, pp. 217–244, 2016.
- [4] D. de Klerk, D. J. Rixen, and S. N. Voormeeren, "General Framework for Dynamic Substructuring: History, Review and Classification of Techniques," *AIAA Journal*, vol. 46, no. 5, pp. 1169–1181, 2008.
- [5] A. Elliott and A. T. Moorhouse, "Characterisation of structure borne sound sources from measurement in-situ," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 123, no. 5, p. 3176, 2008.
- [6] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, "Learning representations by back-propagating errors," *Nature*, vol. 323, no. 6088, pp. 533–536, 1986.
- [7] G. Cybenko, "Approximation by superpositions of a sigmoidal function," *Math. Control Signal Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 303–314, 1989.