

Ermittlung äquivalenter Betriebskräfte an einem Lenkgetriebe mittels Komponentenbasierter Transferpfadanalyse in-situ

Christoph Grünert¹, Dimitrios Ernst Tsokaktsidis¹, Steffen Marburg², Jörn Hübelt³

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

² TU München, Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme, 80333 München

³ Hochschule Mittweida, Fakultät Medien, 09648 Mittweida

Motivation

Zu Beginn eines neuen Projektes in der Automobilindustrie werden Zielwerte für verschiedenste Eigenschaften der Komponenten definiert. Im Bereich Noise, Vibration und Harshness (NVH) wird hierzu häufig die Methode der Transferpfadanalyse (TPA) angewendet, um aus der Kundenwahrnehmung Grenzen auf Komponentenebene abzuleiten. Klassische Techniken haben den Nachteil, die vibroakustischen Eigenschaften einer Quelle mit Rückwirkung der umgebenden Fahrzeugstruktur darzustellen. Daher wurde die vorliegende Lenkung mit der Komponentenbasierten TPA untersucht. Diese Methode bietet die Möglichkeit die anregende Struktur mit unabhängigen Betriebskräften zu charakterisieren. Im Fokus stand das Betriebsgeräusch des Elektromotors, welches beim Durchlenken die dominante Geräuschquelle darstellt.

Umsetzung

Um die gewünschten Ergebnisse zu generieren, wurde das Lenkgetriebe auf folgende Weise untersucht. Im ersten Schritt wurden durch die Anwendung der klassischen TPA mit Matrix Inversion die Hauptübertragungswege im Fahrzeug gefunden. Reduziert auf diese Pfade fand die Komponentenbasierte TPA Anwendung. Um das Lenkgetriebe nicht demontieren zu müssen, wurden die Messungen in-situ am Gesamtfahrzeug durchgeführt. Im Anschluss erfolgte der Übertrag der Methode auf einen Lenkgetriebeprüfstand.

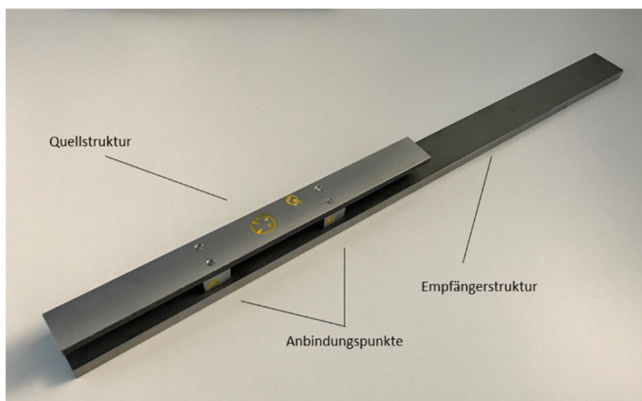


Abbildung 1: Modellversuch zur Validierung der Methode

Parallel zu den Untersuchungen am realen Fahrzeug wurde die angewendete Methode an einem Modellversuch (Abbildung 1) validiert. Dieser besteht aus zwei miteinander verschraubten Flachstählen. Der kleinere der Balken dient

als Quellstruktur, der größer als Empfängerstruktur. An den dazwischenliegenden Koppellementen wurden die Betriebskräfte bestimmt. Um deren Rückwirkungsfreiheit (daher auch äquivalente Kräfte) zu validieren, wurde die Empfängerstruktur in ihren strukturdynamischen Eigenschaften verändert und die Untersuchung wiederholt. Die Theorie sowie die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

Komponentenbasierte TPA in-situ

Bei der Komponentenbasierten TPA handelt es sich im Vergleich zu den klassischen Methoden, wie z.B. der direkten Messung der Betriebskräfte, um eine alternative Herangehensweise.

Auf Basis der Substrukturierungstechnik im Frequenzbereich kann das Übertragungsverhalten einer Gesamtstruktur, bestehend aus Quelle, Empfänger und Übertragungspfaden, mit der folgenden Formel beschrieben werden. Die Antwort u_3 kann aus der Admittanzmatrix und der inneren Quellkraft bestimmt werden. Abbildung 2 veranschaulicht die Zusammenhänge.

$$u_3 = Y_{31}^{AB} f_1 \quad (1)$$

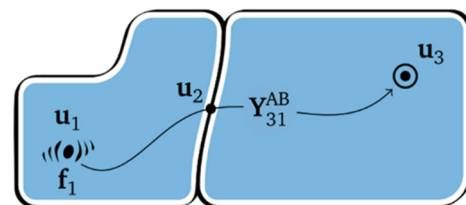


Abbildung 2: TPA-Modell Gesamtsystem [5]

Zerlegt man die Struktur in Quelle A und Empfänger B , ergibt sich Gleichung 2. Aus den Admittanzen der Einzelkomponenten und den wirkenden Kräften (Schnittkraft g_2 und innere Kraft f_i) kann die Antwort u_3 bestimmt werden. Das in seine Komponenten zerlegte System zeigt Abbildung 3.

$$u_3 = Y_{32}^B g_2^B = Y_{32}^B (Y_{22}^A + Y_{22}^B)^{-1} Y_{21}^A f_1 \quad (2)$$

Da in den seltensten Fällen die innere Kraft auf einfache Weise bestimmbar ist, werden auf Basis dieser Formel unterschiedliche Techniken angewendet, um die Quellstruktur zu beschreiben. Die Komponentenbasierte TPA führt an dieser Stelle sogenannte äquivalente Kräfte ein, die unabhängig von der Rückwirkung der

Empfängerstruktur einzig die Komponente *A* beschreiben können.

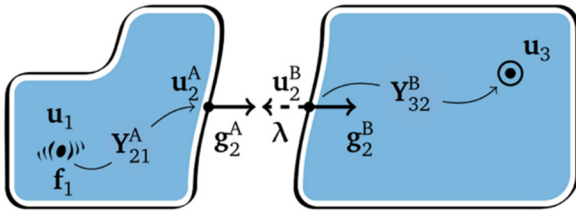


Abbildung 3: TPA-Modell zerlegt in Quelle *A* und Empfänger *B* [5]

Die äquivalenten Kräfte wirken als Schnittkräfte. Die innere Kraft, meist nicht bestimmbar, wird als unbekannt angesehen (Abbildung 4). Analog zur oben beschriebenen Zerlegung kann das TPA-Modell gemäß Formel 3 neu definiert werden.

$$u_3 = Y_{32}^{AB} f_2^{eq} = [Y_{32}^B (Y_{22}^A + Y_{22}^B)^{-1} Y_{22}^A] f_2^{eq} \quad (3)$$

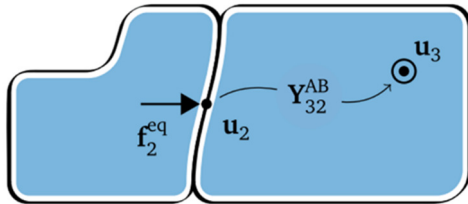


Abbildung 4: Komponentenbasierte TPA des Gesamtsystems [5]

Da die Antwort u_3 weiterhin aus der inneren Kraft der Quelle hervor gehen soll, wird Formel 3 mit Formel 2 gleichgesetzt. Umformen ergibt Formel 4, bei der die Kräfte nun einzig von den Eigenschaften der Komponente *A*, also der Quelle abhängen.

$$f_2^{eq} = (Y_{22}^A)^{-1} Y_{21}^A f_1 \quad (4)$$

Basierend auf diesem Konzept gibt es verschiedene Wege die gewünschten Kräfte zu ermitteln. Eine recht praxisnahe Anwendung stellt der Hybride Ansatz dar, bei dem die Struktur in einer realen Umgebung vermessen wird. Dieser ist in Abbildung 5 illustriert und kann mit Formel 5 beschrieben werden. Die innere Kraft wird dabei eliminiert.

$$f_2^{eq} = g_2^R + (Y_{22}^A)^{-1} u_2 \quad (5)$$

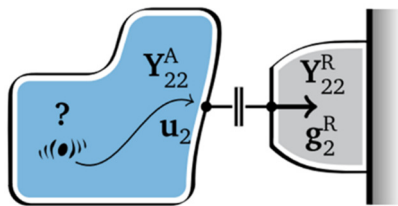


Abbildung 5: Komponentenbasierte TPA mit hybridem Ansatz [5]

Um die Gesamtstruktur nicht zerlegen und keine Kräfte direkt messen zu müssen, bietet es sich an die beschriebene

Technik in-situ anzuwenden. Dabei wird die Kraft g_2 durch die Empfänger-Admittanz und Verschiebungen an der Schnittstelle ersetzt.

Anschließend werden die Einzeladmittanzen durch die Gesamtadmittanz ausgedrückt. Überbestimmung mit Indikatoren, hier auch Remotepunkte genannt, führt zu Formel 6 die letztendlich Anwendung (vergl. Abbildung 6) fand.

$$f_2^{eq} = (Y_{42}^{AB})^+ u_4 \quad (6)$$

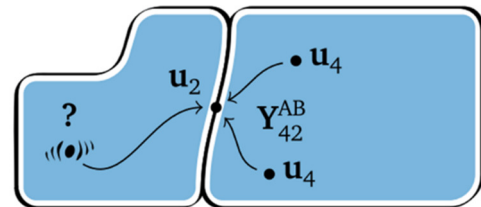


Abbildung 6: Komponentenbasierte TPA in-situ [5]

Von Vorteil ist die Vergleichbarkeit zur klassischen TPA mit Matrix Inversion, bei der zur Berechnung der Pseudoinversen in der Regel die Singulärwertzerlegung Anwendung findet.

Modellversuch

Zur Validierung der Methode wurde das beschriebene Modell an der Quellstruktur mit einem Impulshammer, sowie mit einem Exzentermotor als periodische Anregung beaufschlagt. Beide Messungen wurden mit zwei verschiedenen Empfängerstrukturen durchgeführt. Diese weichen in der Länge voneinander ab, um sich in ihren strukturendynamischen Eigenschaften zu unterscheiden. Die bestimmten Kräfte werden in den folgenden Diagrammen gegenübergestellt.

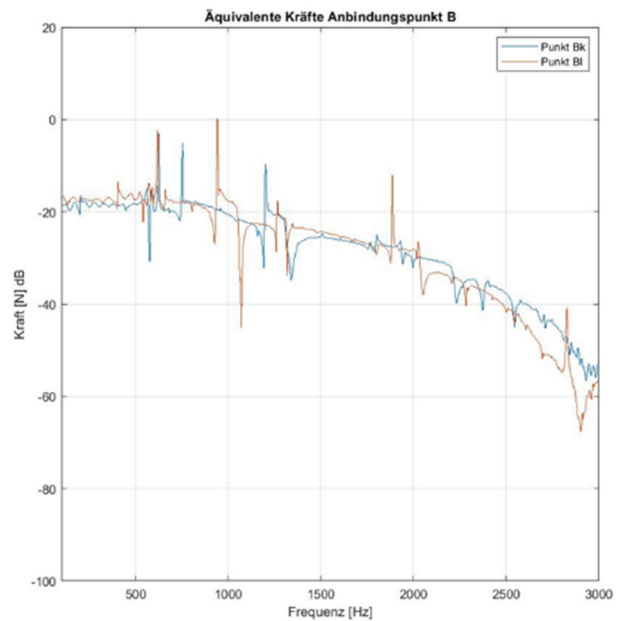


Abbildung 7: Äquivalente Kräfte Prinzipversuch mit Hammeranregung

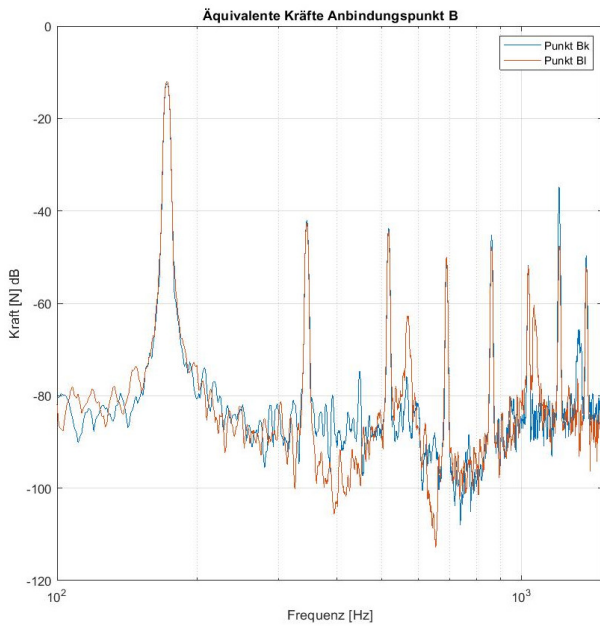


Abbildung 8: Äquivalente Kräfte Prinzipversuch mit Exzenteranregung

Die äquivalenten Kräfte der Hammermessung in Diagramm 7, als auch die der Anregung mit Exzentermotor (Abb. 8) zeigen sehr gute Übereinstimmung. Der typische spektrale Verlauf des Impulshammers findet sich im Kraftspektrum wieder. Der Pegel ist in weiten Frequenzbereichen auf gleichem Niveau. Betrachtet man in Diagramm 8 die Unwucht-Ordnung des Exzeters (160Hz) stimmen Pegel und Frequenz exakt überein. Zusätzlich zum Vergleich der Kräfte fand die sogenannte On Board Validation (OBV) Anwendung. Dabei wird ein zusätzlicher Antwortpunkt aus den bestimmten Kräften berechnet und mit dessen Messung verglichen. Die dafür benötigte Übertragungsfunktion findet bei der Berechnung der Pseudoinversen keine Anwendung. Die OBV beider Messreihen, dargestellt in Abbildung 9 und 10, zeigt gute Übereinstimmung.

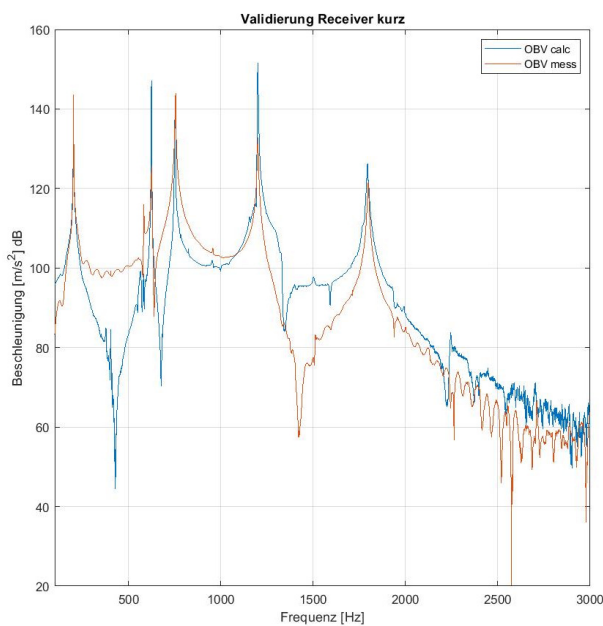


Abbildung 9: On Board Validation Prinzipversuch mit Hammeranregung

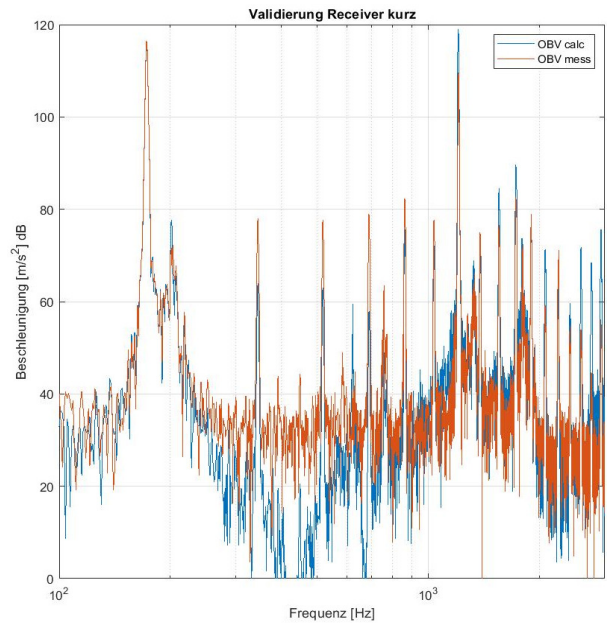


Abbildung 10: On Board Validation Prinzipversuch mit Exzenteranregung

Fahrzeugmessung

Übertragen auf die reale Umgebung eines Fahrzeugs konnten im Bereich bis ca. 800Hz die äquivalenten Kräfte des untersuchten Lenkgetriebes sehr gut bestimmt werden. Bei höheren Frequenzen liefert die Methode basierend auf der OBV noch gut belastbare Ergebnisse. Die anregungstypischen Frequenzbereiche finden sich im Spektrum wieder (Abbildung 11 und 12).

Der hier nicht dargestellte Prüfstandsversuch zeigt ähnliche Ergebnisse bei etwas mehr Unschärfe in der Validierung.

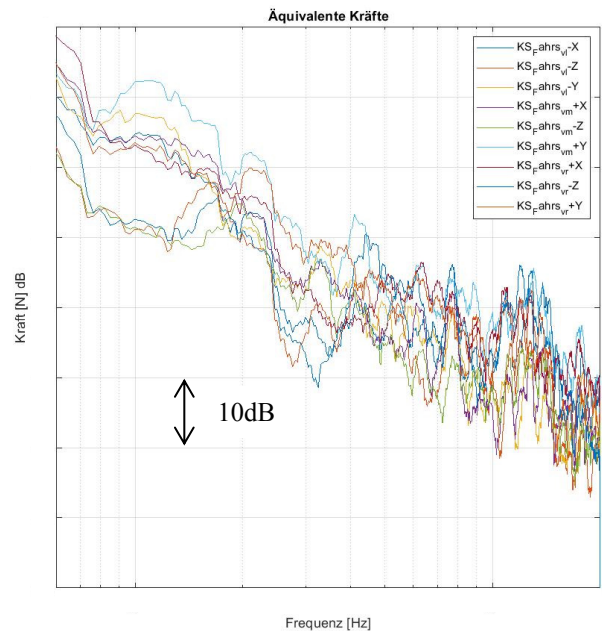


Abbildung 11: Äquivalente Kräfte am Lenkgetriebe im Fahrzeug

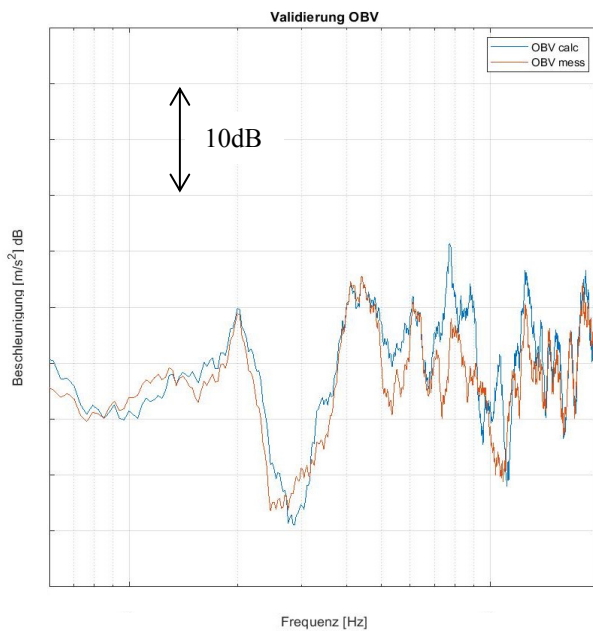


Abbildung 12: OBV der Messung im Fahrzeug

Literatur

- [1] T. Alber, M. Sturm, A. Moorhouse, Independent characterization of structure-borne sound sources using the in-situ blocked force method, *inter.noise 2016*
- [2] S. Elliott, A. T. Moorhouse, Characterisation of structure borne sound sources from measurement in-situ, *J. Acoust. Soc. Am.* 123 (5) (2008) 3176, <http://dx.doi.org/10.1121/1.2933261>
- [3] C. Grünert, Ermittlung äquivalenter Betriebskräfte an einem Lenkgetriebe mittels Komponentenbasierter Transferpfadanalyse in-situ, Masterarbeit, HS Mittweida 2019
- [4] T. Moorhouse, A. S. Elliott, T. A. Evans, In situ measurement of the blocked force of structure-borne sound sources, *J. Sound Vib.* 325 (4-5) (2009), 679–685, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2009.04.035>
- [5] Maarten V. van der Seijs, Dennis de Klerk, Daniel J. Rixen, General framework for transfer path analysis: History, theory and classification of techniques, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.08.004>