

# Transferpfadanalyse auf Basis der Vierpolmethode bei Mehrquellenanregung in der Fahrzeugakustik

Maximilian Herrnberger<sup>1,2</sup>, Lennart Moheit<sup>2</sup>, Philipp Wagner<sup>1</sup>, Timo Lohmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Bertrandt Ing.-Büro GmbH, Timo.Lohmann@de.bertrandt.com*

<sup>2</sup> *TU München, Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme, Max.Herrnberger@outlook.de*

## Einleitung

Die zunehmende Reduzierung der Fahrgeräusche erfordert auch eine Reduzierung von Störgeräuschen. Um passende Maßnahmen abzuleiten, sind im Produktentstehungsprozess Methoden zur Analyse akustischer Schwachstellen erforderlich. Dabei kann die Transferpfadanalyse (TPA) zur Identifikation von Hauptbeitragsleistern und deren Übertragungswege in den Fahrzeuginnenraum hilfreich sein.

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Durchführung einer vierpolbasierten TPA an einem Mittelklassefahrzeug. Dabei wird eine Mehrquellenanregung durch die Vorderachse betrachtet und der dadurch induzierte Innenschalldruck mit Hilfe eines TPA-basierten Matlab-Tools berechnet.

## Stand der Technik

In diesem Abschnitt wird der Stand der Technik erläutert. Dazu wird sowohl auf die Transferpfadanalyse im Allgemeinen, als auch auf die Vierpolmethode im Speziellen eingegangen.

## Grundlagen der Transferpfadanalyse

Die Transferpfadanalyse ist eine systematische Methode zur Identifikation der Hauptbeitragsleister von NVH-Phänomenen sowie zur Quantifizierung von Quellen und Transferpfaden [1]. Für  $n$  Körperschall- und  $m$  Luftschallpfade berechnet sich der Schalldruck im Fahrzeuginnenraum wie folgt [7]:

$$p = \sum_n H_{KS} F_{ind} + \sum_m H_{LS} Q_{ind}. \quad (1)$$

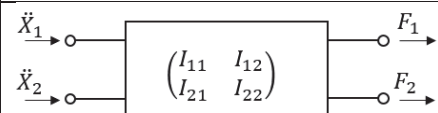
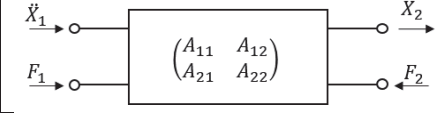
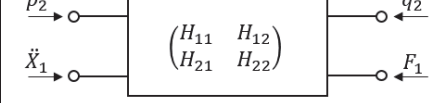
Es wird deutlich, dass der Körperschall sowohl von der Übertragung der Körperschallpfade  $H_{KS}$  als auch von der indirekten Kraft  $F_{ind}$  abhängig ist. An dieser Stelle stellt die Vierpolmethode eine Möglichkeit dar, die indirekten Kräfte innerhalb der Übertragungspfade abzuschätzen.

## Grundlagen der Vierpolmethode

Bei einem Vierpol handelt es sich um einen Übertragungsblock, welcher je zwei Ein- und Ausgänge aufweist. Die Vierpolmethode stammt ursprünglich aus der Elektrotechnik und wurde durch eine Analogiebetrachtung in die Akustik überführt [6].

Es gibt verschiedene Darstellungsformen für Vierpole. Drei wesentliche Formen, welche bei dieser TPA-Beschreibung verwendet werden, sind in Tabelle 1 aufgelistet. Sie sind in der Literatur in den Quellen [2], [3] und [4] zu finden.

**Tabelle 1:** Verwendete Vierpol-Beschreibungsformen

Variante	Darstellung
Inertanzform	
Kettenform	
Hybridform	

Die Vierpole sind durch 2x2 Vierpolmatrizen charakterisiert, welche lineare, zeitinvariante (LTI) Übertragungsfunktionen darstellen. Die Inertanzform eignet sich insbesondere für die parallele Verkettung von Vierpolen, da sich hier ein Ersatzvierpol durch die Addition der einzelnen Vierpolparameter berechnen lässt. [6]

Werden Vierpolelemente seriell verkettet, bietet sich die Verwendung der Kettenform an, wobei der Vierpol geometrisch interpretiert werden kann. Dann sind eingangsseitig beispielsweise Vorlagergrößen und ausgangsseitig Nachlagergrößen dargestellt. In dieser Form lassen sich Ersatzvierpole von seriellen Verkettungen durch eine Multiplikation der Vierpolmatrizen darstellen [2].

Darüber hinaus wurden hybride Vierpole verwendet, welche eine Kopplung zwischen Körperschall- und Luftschall-Größen ermöglichen [3]. Sie stellen den Zusammenhang zwischen indirekten Kräften und den daraus resultierenden Schalldruckbeiträgen einzelner Pfade zum Gesamtschalldruck her.

## Modellbildung

Zur vierpolbasierten Beschreibung einer Vorderachse wurden einige Modellannahmen getroffen, welche nachfolgend erläutert werden. Anschließend wird ein Vierpolnetzwerk vorgestellt, welches eine McPherson Vorderachse abbildet. Die dazugehörigen Vierpolparameter werden entweder messtechnisch bestimmt oder aus einem Federdämpfer-Modell abgeleitet.

### Getroffene Annahmen

Bei der durchgeführten Transferpfadanalyse wurde die Auswirkung der Anregung der Vorderachse bei der Überfahrt einer rauen Fahrbahn betrachtet. Da sich Abrollgeräuschphänomene insbesondere im Bereich zwischen 100 Hz und 300 Hz abspielen, wurde nur dieser Frequenzbereich betrachtet.

Bei dem untersuchten Fahrzeug handelte es sich um ein frontgetriebenes Mittelklassefahrzeug, weshalb der Einfluss der Hinterachse vernachlässigt wurde.

Um die Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Raumrichtungen zu erfassen, wurden diese mit Hilfe parallel verschalteter Vierpole gemäß Abbildung 1 modelliert. Rotatorische Freiheitsgrade werden bei der Vierpolmodellierung vernachlässigt.

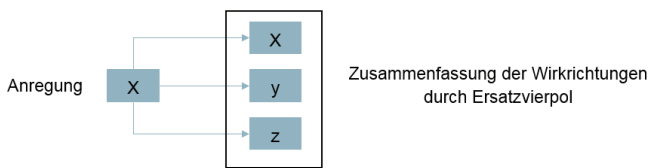


Abbildung 1: Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen den Raumrichtungen durch parallel verkettete Vierpole

### Konzeption eines Vierpolnetzwerkes für eine McPherson Vorderachse

Für die Körperschallübertragung der Vorderachse wurden vier Hauptpfade berücksichtigt:

- Federbein und Stützlager
- Querlenker vorne
- Querlenker hinten
- Spurstange

Diese Pfade werden durch Vierpole repräsentiert und lassen sich zu einem Vierpolnetzwerk verschalten, das in Abbildung 2 zu sehen ist.

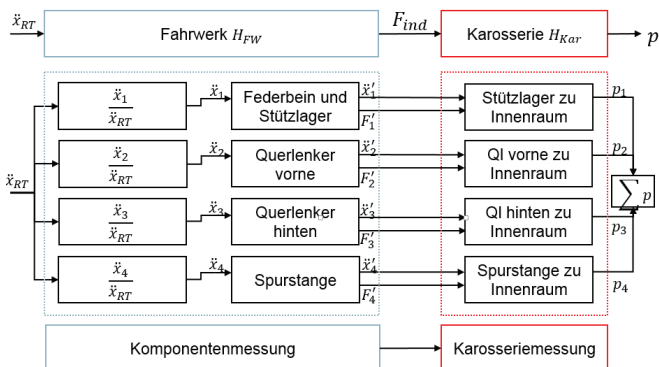


Abbildung 2: Darstellung des Vierpol-Netzwerkes für eine McPherson Vorderachse

### Bestimmung der Vierpolparameter

Zur Bestimmung der Vierpolparameter wurden Impulshammermessungen durchgeführt. Dabei kann zwischen Komponentenmessungen und Karosseriemessungen unterschieden werden. Die Komponentenmessungen dienen der Bestimmung der Inertanzvierpole und wurden im Einbauzustand an Fahrwerkskomponenten durchgeführt. Die dabei ermittelten Vierpolparameter sind in Gleichung 2 aufgelistet.

$$I_{11} = \frac{\ddot{X}_1}{F_1} ; I_{12} = \frac{\ddot{X}_1}{F_2} ; I_{21} = \frac{\ddot{X}_2}{F_1} ; I_{22} = \frac{\ddot{X}_2}{F_2} \quad (2)$$

Zur experimentellen Bestimmung muss dabei sowohl am Vorlager als auch am Nachlager mit einer bekannten Kraft angeregt werden und die Beschleunigungen analog jeweils an Vor- und Nachlager ausgewertet werden. Diese bidirektionale Messung ist erforderlich, um die Rückwirkungen im System abzubilden und unterscheidet den Vierpolansatz von einer Systembeschreibung durch Zweipol-Übertragungsglieder [6].

Bei den Karosseriemessungen wird analog zur Bestimmung hybrider Vierpolparameter vorgegangen. Dabei wird Karosserie-seitig ebenfalls mit einer Kraft angeregt und der Schalldruck im Innenraum ausgewertet. Bei der reziproken Messung wird mit einer Schallflussquelle im Innenraum angeregt und anschließend werden die Beschleunigungssignale an den Fahrwerkskoppelstellen ausgewertet.

### Modellierung des Stützlagerpfades

Da die messtechnische Bestimmung der Vierpolparameter des Stützlagerpfades aufgrund seiner eingeschränkten Zugänglichkeit nicht möglich war, wird dieser Pfad als Federdämpfer-System modelliert.

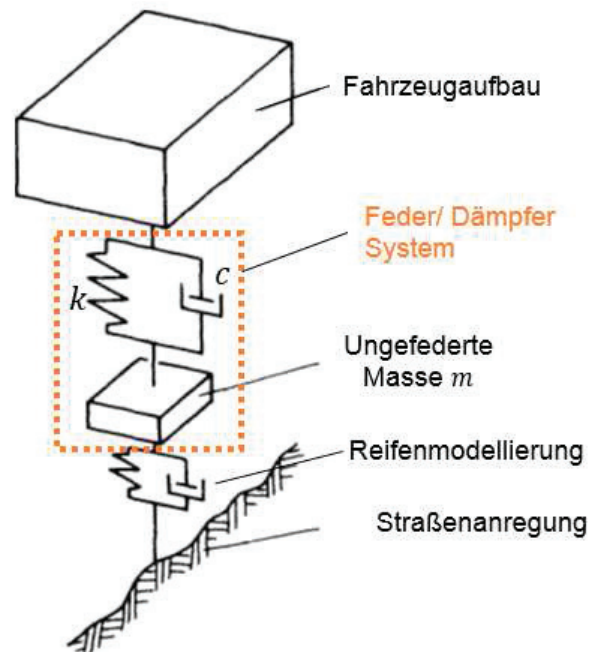


Abbildung 3: Modellierung des Stützlagerpfades als Federdämpfer-System nach [8]

Das verwendete Federdämpfer-System lässt sich in Vierpolschreibweise wie in Gleichung 3 darstellen.

$$\begin{pmatrix} \ddot{X}_2 \\ F_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{m}{c} \omega \frac{k}{\omega^2} + 1 & \frac{-1}{\frac{c}{\omega} \frac{k}{\omega^2}} \\ \frac{c}{\omega} \frac{k}{\omega^2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{X}_1 \\ F_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Die Beschreibung basiert auf Grundgleichungen der Mechanik mit  $k$  als statischer Federsteifigkeit und  $c$  als Dämpferkonstante.

### Ergebnisse der Transferpfadanalyse

Die Ergebnisse wurden mit Hilfe eines implementierten Matlab-Tools generiert, welches auf Vierpolgleichungen basiert.

### Berechnung indirekter Kräfte

Die Berechnung der indirekten Kräfte  $F_{ind}$  ergibt sich durch Umformen dieser Vierpolgleichungen. Dabei lässt sich mit Hilfe einer Vierpolmatrix in Kettenform der Zusammenhang gemäß Gleichung (4) ableiten.

$$F_{ind} = \frac{-A_{21}}{\det(\mathbf{A})} \ddot{X}_1 \quad (4)$$

Die indirekte Kraft ist dabei auch von der Determinante der Kettenmatrix  $\mathbf{A}$  abhängig, welche als ein Maß für Rückwirkungen im betrachteten System gesehen werden kann.

Für das untersuchte Fahrzeug sind beispielhaft indirekte Kräfte innerhalb der zuvor identifizierten Pfade in Abbildung 4 dargestellt.

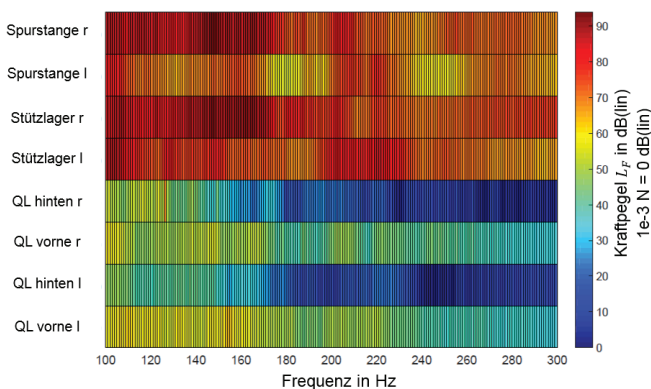


Abbildung 4: Darstellung der indirekten Kräfte in y-Richtung

Die indirekten Kräfte in Spurstange und Stützlager weisen deutlich höhere Werte auf, als die in den Querlenkerlagern. Die Spurstangenkräfte erreichen ihre höchsten Werte dabei in der hier gezeigten y-Richtung.

Während die Kräfte in den Querlenkerlagern symmetrisch verlaufen, gibt es bei Stützlagern und Spurstange deutliche Unterschiede. Dies ist bei der Spurstange plausibel, da diese nicht symmetrisch aufgebaut ist.

### Beiträge der Pfade

Verwendet man die ermittelten indirekten Kräfte als Eingangsgrößen für die hybriden Vierpole, lassen sich die pfadweise induzierten Schalldrücke berechnen. Die Beiträge

aus den unterschiedlichen Wirkrichtungen lassen sich dabei durch komplexe Addition gemäß Gleichung (5) zu einem Gesamtpfadbeitrag verrechnen.

$$p = p_x + p_y + p_z; \text{ mit } p_i \in \mathbb{C} \quad (5)$$

Die Pfadbeiträge sind in Abbildung 5 als Schalldruckpegel für den Bereich zwischen 100 Hz und 300 Hz dargestellt.

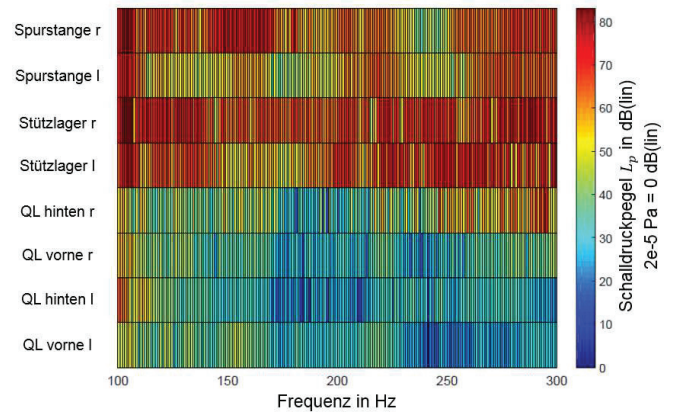


Abbildung 5: Darstellung der Pfadbeiträge am Gesamtschalldruck im Innenraum

Es wird deutlich, dass die Hauptpfade in dieser Transferpfadanalyse durch die Stützlagerpfade und die Spurstange dargestellt werden.

### Schalldrucksynthese

Diese Einzelschalldrücke können durch komplexe Addition zu einem Gesamtschalldruck im Innenraum verrechnet werden, welcher als Schalldruckpegel in Abbildung 6 dargestellt ist. Dabei wurde die ungedeferte Masse als Eingangsgröße im Matlab-Tool variiert, wodurch unterschiedliche Synthesekurven erzeugt wurden.

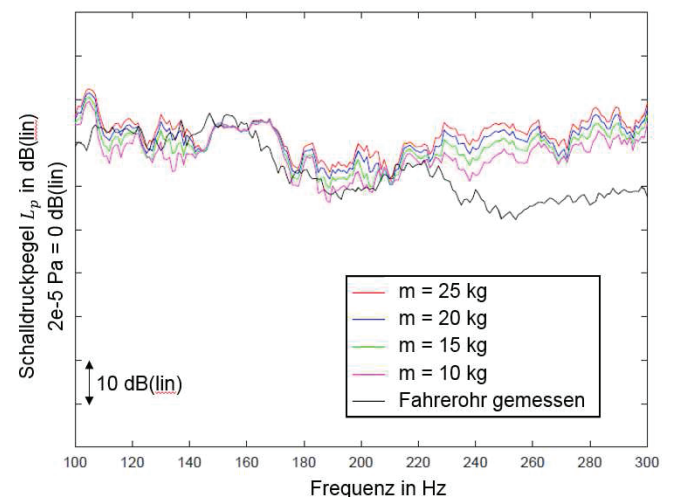
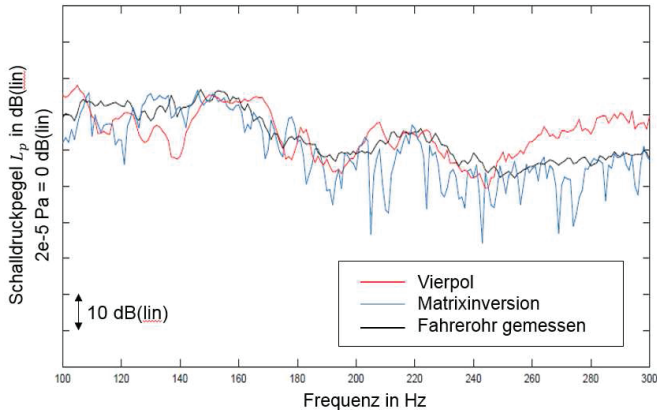


Abbildung 6: Schalldrucksynthese mit unterschiedlichen ungedeferten Massen

Dabei fällt auf, dass die Synthese für Frequenzen über 220 Hz deutlich überschätzt wird. Bei der Betrachtung der Einzelschalldrücke ist diese Überschätzung insbesondere auf den modellierten Stützlagerpfad zurückzuführen. Eine höhere Genauigkeit des betrachteten Pfades kann durch eine detailliertere Modellierung des Stützlagers erzielt werden.

## Vergleich der Ergebnisse mit anderen Transferpfadanalysen

Zur Validierung des vierpolbasierten Ansatzes wurden die erzielten Ergebnisse mit denen einer Matrixinversion verglichen. Die jeweiligen Synthesekurven sowie der am Fahrerohr gemessene Schalldruckpegel sind in Abbildung 7 dargestellt.



**Abbildung 7:** Vergleich Vierpol-basiertes und Matrixinversions-basiertes Syntheseergebnis

Dabei fällt auf, dass beide Methoden vergleichbare Ergebnisse liefern. Die Matrixinversion führt hier zu einem un stetigen Verlauf, was auf numerische Probleme bei der Lösung des linearen Gleichungssystems zurückzuführen ist. Dieser un stetige Verlauf kann durch die Verwendung mehrerer Sensoren (Doppelinstrumentierung) vermieden werden, da so weitere Gleichungen für den Solver zur Verfügung stehen, was jedoch zu einem unerwünschten Mehraufwand während der Messungen führt.

Die vierpolbasierte TPA liefert im Bereich von etwa 150 Hz bis 250 Hz die besten Ergebnisse. Bei dieser Methode lassen sich im Unterschied zur dargestellten Matrixinversion die Teilbeiträge rückwirkungsbehaftet modifizieren sodass eine genauere Auslegung der Komponenten ohne größeren Mehraufwand möglich ist.

Bei obigen Syntheseergebnissen kann bei der Vierpolmethode im Gegensatz zur Matrixinversion auf eine Hauptkomponentenanalyse zur Trennung der Quellen verzichtet werden.

## Fazit und Ausblick

Im Vergleich zu anderen kommerziell umgesetzten Methoden wie der Matrixinversion lässt sich eine ähnliche Ergebnisqualität im relevanten Frequenzbereich erzielen. Dabei sind wesentliche Vorteile der Methode:

- Rückwirkungsbehaftete Modellierung der Pfade
- Hauptkomponentenanalyse zur Trennung der Quellen nicht erforderlich
- Reduzierter Rüstaufwand bei der Betriebsdatenerfassung
- Genauere Zuordnung der Pfade durch quellnahe Beschreibung

Für weitere Arbeiten wird empfohlen, den Stützlagerpfad entweder detaillierter zu modellieren (ggf. als FEM-Modell)

oder weitere Methoden der messtechnischen Bestimmung von Vierpolparametern anzuwenden. Zudem ist es denkbar, für den Stützlagerpfad die indirekten Kräfte aus anderen Analysen zu bestimmen und eine hybride Methode zu entwickeln.

## Literatur

- [1] M. 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*, pages 217–244, 2016.
- [2] C. T. Molloy. Use of four-pole parameters in vibration calculation. *Journal of Acoustical Society of America*, 29(7):842–853, 1957.
- [3] H. Sell. Charakterisierung des dynamischen Verhaltens von elastischen Bauteilen im Einbauzustand: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Dissertation, Weinheim, 2005.
- [4] M. Holl. Anwendung der mechanischen Vierpolmethode zur Berechnung des Fahrzeuginnengeräusches und zur Auslegung von elastischen Lagern. Masterarbeit, TU Darmstadt, 2014.
- [5] K. Fülber. Systemansatz zur Untersuchung und Beurteilung des Abrollkomforts von Kraftfahrzeugen bei der Überfahrt von Einzelhindernissen. Dissertation, Aachen, 2001.
- [6] P. Zeller. *Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung*, Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH. Wiesbaden, 1. Auflage, Edition 2009.
- [7] W. Claes. *Test based transfer path analysis*. LMS International - Engineering Innovation, 2016.
- [8] M. Mitschke and H. Wallentowitz. *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2014.