

# Geräuschpfadanalyse für hochfrequenten Körperschall

Hendrik Sell

Vibracoustic GmbH & Co. KG, Hamburg

## 1. Einführung

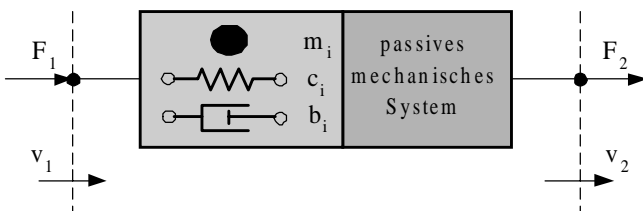
Das akustische Verhalten von Fahrzeugen gewinnt zunehmend als Qualitäts- und Komfortfaktor an Bedeutung. Nach dem Einsatz von numerischen Verfahren zur Akustikoptimierung in der Konzeptphase werden in der Prototypenphase häufig hybride Verfahren eingesetzt, die auf Messungen und Berechnungen aufbauen. Zu den hybriden Verfahren zählt auch die Geräuschpfadanalyse, die im Automobilbau häufig bei Motor-, Antriebstrang- oder Rollgeräuschen eingesetzt wird.

Dieser Beitrag zeigt eine Erweiterung der Körperschall-Geräuschpfadanalyse. Für hohe Frequenzen können elastische Bauteile wie Motor- oder Fahrwerkslager nicht wie üblich als ideale Federn angesehen werden. Die hier vorgestellte Vierpol-Modellierung findet daher bei hohen Frequenzen Anwendung, da dann auch Massen- und Kopplungseffekte innerhalb der Lager oder zwischen Lager und Karosserie berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu der herkömmlichen Beschreibung der Lagereigenschaften durch dynamische Steifigkeiten werden die elastischen Bauteile jetzt durch Eingangs-, Übertragungs- und Ausgangssteifigkeiten beschrieben. Die Unterschiede zwischen klassischer und erweiterter Geräuschpfadanalyse werden anhand einer selbstentwickelten Software gezeigt.

## 2. Bauteilbeschreibung mit Vierpolen

Die elastischen Lagerungen sollen in der vorliegenden Arbeit genauer als bisher üblich modelliert werden. Hierzu werden die einzelnen Lager nicht nur durch eine Federsteifigkeit als ideale masselose Federn beschrieben, sondern durch eine Vierpolbeschreibung abgebildet. Somit werden neben dem Übertragungsverhalten auch das Eingangs- und Ausgangsverhalten berücksichtigt. Eine Vierpolmodellierung setzt ein lineares, passives und zeitinvariantes System voraus. Die nachfolgend vorgestellten Vierpolparameter können aber frequenzabhängig sein. An Nichtlinearitäten sind bei Gummi-Metall Lagern vor allen Dingen die Amplitudenabhängigkeit der Steifigkeit und die möglichen geometrischen Nichtlinearitäten durch Konturierung der Lager zu nennen. Durch die Ermittlung der Vierpolparameter mit den original Vorlasten und mit einem typischen Amplitudenspektrum kann eine gute Linearisierung vorgenommen werden.

In **Bild 1** ist ein mechanischer Vierpol mit den Eingangsgrößen Kraft und Geschwindigkeit und den Ausgangsgrößen Kraft und Geschwindigkeit gezeigt.



**Bild 1:** Mechanischer Vierpol

Der Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen lässt sich günstig in Matrix-Schreibweise darstellen.

$$\begin{bmatrix} \underline{F}_1 \\ \underline{F}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{v}_1 \\ \underline{v}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Die Vierpolparameter sind in diesem Fall die Ein- und Ausgangsimpedanzen  $\underline{Z}_{11}$  und  $\underline{Z}_{22}$ , sowie die Transferimpedanzen vorwärts und rückwärts  $\underline{Z}_{21}$  und  $\underline{Z}_{12}$ . Aufgrund der Reziprozitätsbeziehung sind die beiden Transferimpedanzen gleich groß.

Für Geräuschpfadanalysen ist eine andere Formulierung vorteilhafter.

$$\begin{bmatrix} \underline{F}_1 \\ \underline{v}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} \\ \underline{A}_{21} & \underline{A}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{F}_2 \\ \underline{v}_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

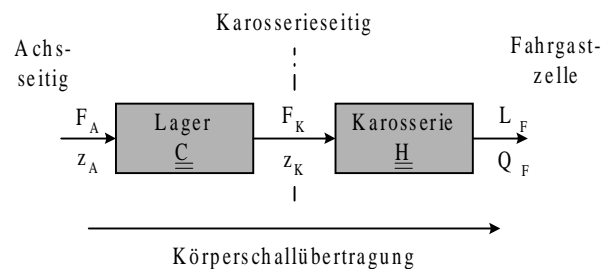
In der sogenannten Kettenform sind die Eingangsgrößen von den Ausgangsgrößen getrennt. Dies ist vorteilhaft, wenn mehrere Vierpole in Reihe gekoppelt werden. Die Gesamtmatrix ergibt sich dann sehr einfach aus dem Produkt der Einzelmatrizen.

$$\underline{A}_{\text{Ges}} = \prod_{i=1}^n \underline{A}_i \quad (3)$$

Die Reziprozität sorgt bei der Kettenform dafür, dass die Determinante der Matrix gleich eins ist. Für die Geräuschpfadanalyse werden Wege statt Geschwindigkeiten als Vierpol Ein- und Ausgänge gewählt.

## 3. Theorie der Geräuschpfadanalyse

Die Modellierung eines Geräuschpfades mit Hilfe von zwei Vierpolen ist in Bild 2 zu sehen. Der erste Vierpol beschreibt die Lagereigenschaften und stellt somit eine Verknüpfung von Kraft und Weg vor und hinter dem Lager dar. Der zweite Vierpol beschreibt das vibroakustische Verhalten der Karosserie. Hier werden Kraft und Weg vor dem Lager mit Schalldruck und Schallfluss an einem Punkt des Fahrzeuginnenraumes gekoppelt.



**Bild 2:** Modellierung eines Geräuschpfades

Bringt man die beiden Vierpole in die oben beschriebene Kettenform, so lässt sich die gesamte Systemübertragung durch Multiplikation der beiden Vierpolmatrizen berechnen. Für den gesuchten Zusammenhang zwischen Luftschall im Fahrzeug und Betriebsauslenkung vor dem Lager ergibt sich folgende Gleichung.

$$\underline{L}_F = \frac{\underline{C}_{KA} \cdot \underline{H}_{FK}}{1 + \underline{C}_{KK} \cdot \underline{H}_{KK}} \cdot \underline{z}_A \quad (4)$$

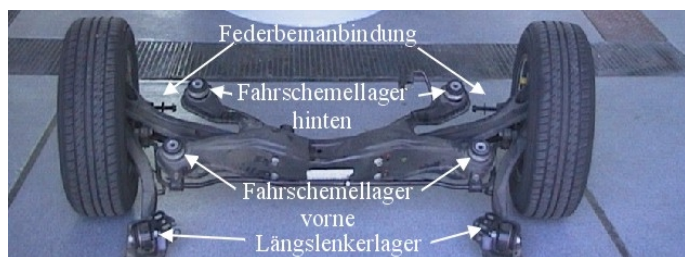
Hierbei ist  $\underline{L}_F$  der Teilschalldruck des betrachteten Geräuschpfades,  $\underline{C}_{KA}$  die Transfersteifigkeit des Lagers,  $\underline{C}_{KK}$  die Aus-

gangssteifigkeit des Lagers,  $H_{KK}$  die Eingangsnachgiebigkeit der Karosserie,  $H_{FK}$  die Luftschallempfindlichkeit (oft auch als *body noise transfer function* bezeichnet) und  $z_A$  die Betriebsauslenkung. Eine aktuelle Übersicht zu den verschiedenen Möglichkeiten der messtechnischen Gewinnung von Lager-Vierpolparametern bietet [1].

Den rechnerischen Gesamtschalldruck erhält man durch Summation der einzelnen Teilschalldrücke. Im unteren Frequenzbereich ist eine phasenrichtige Summation durch die komplexwertigen Schalldruckspektren sinnvoll. Bei höheren Frequenzen sollte energetisch addiert werden, da die Streuung der Bauteileigenschaften keine gleichbleibende Phasenlage mehr ermöglicht.

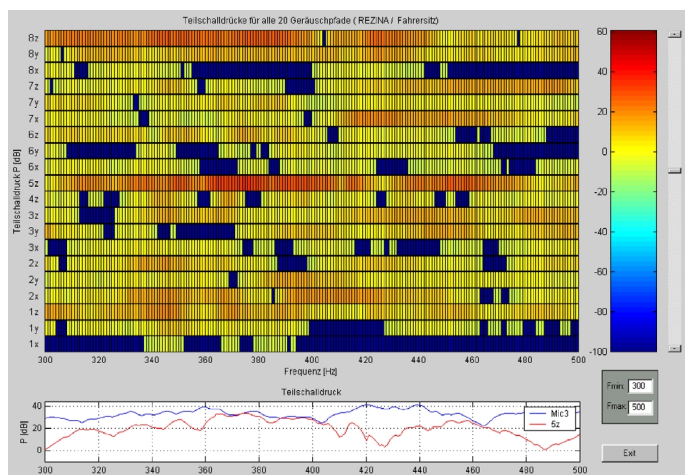
#### 4. Ergebnisse

In dem Nachfolgenden Beispiel wird die in **Bild 3** gezeigte Hinterachse untersucht. Sie ist über vier Fahrstummellager, zwei Längslenkerlager und zwei Federbeine an die Karosserie angebunden. Bei den sechs Lagern werden alle drei Raumrichtungen berücksichtigt, bei den Federbeinen nur die Hochrichtung. Es ergeben sich somit 20 Geräuschpfade.



**Bild 3:** Untersuchte PKW-Hinterachse

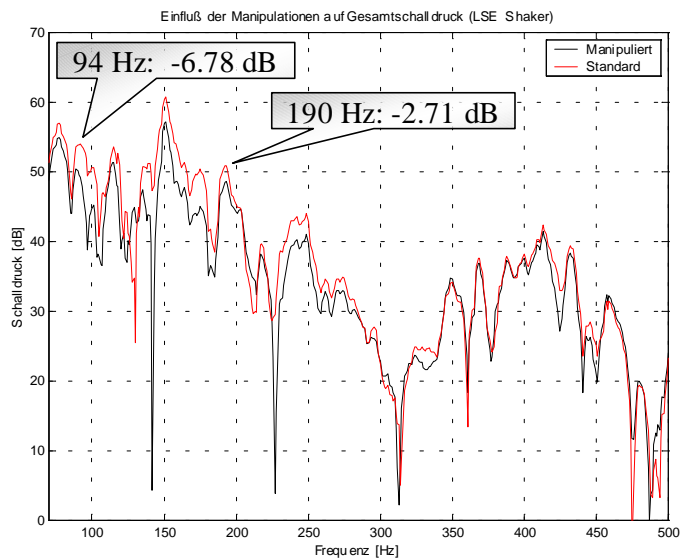
Eine sehr kompakte Darstellung von Ergebnissen der Geräuschpfadanalyse zeigt **Bild 4**. In der oberen Bildhälfte sind die Teilschalldrücke der 20 Geräuschpfade über die Frequenz aufgetragen. Anhand der Verfärbung kann schnell auf dominante Pfade bei speziellen Problemfrequenzen geschlossen werden. Ferner lässt sich erkennen, über welchen Frequenzbereich sich dominante Pfade erstrecken. In der unteren Bildhälfte ist der Teilschalldruck eines Pfades dem gemessenen Innenraum-schalldruck gegenübergestellt.



**Bild 4:** Ergebnisübersicht der Geräuschpfadanalyse

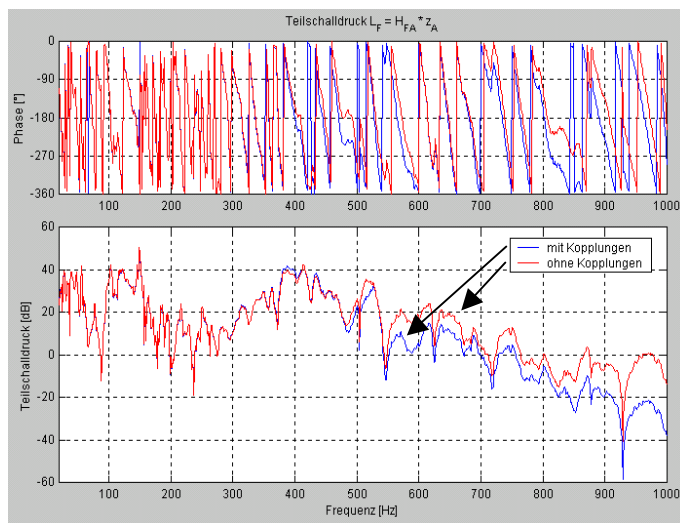
Neben der in **Bild 4** gezeigten Ergebnisübersicht erhält man noch wesentlich detailliertere Aussagen zu der Zusammensetzung des Schalldrucks bei bestimmten Problemfrequenzen und zu den Ursachen von Teilschalldrucküberhöhungen bei speziellen Pfaden.

Durch Variation der Lagereigenschaften im Rechenmodell lassen sich nun auch Abschätzungen von Modifikationen durchführen. **Bild 5** zeigt die Auswirkung Steifigkeitsreduzierungen an einigen Lagern. Man kann erkennen, dass diese Maßnahme bis zu einer Frequenz von 300 Hz Senkungen des Schalldrucks erwarten lässt.



**Bild 5:** Abschätzung von Modifikationen

Den Unterschied zwischen der Vierpolmodellierung und der klassischen Geräuschpfadanalyse zeigt **Bild 6** anhand des Teilschalldrucks über ein Federbein.



**Bild 6:** Teilschalldruck mit und ohne Kopplungseinflüsse

Man erkennt ab ca. 400 Hz eine anwachsende Differenz zwischen den berechneten Teilschalldrücken, die bei 1000 Hz schon in der Größenordnung von 20 dB liegt. Dabei wird ohne die Vierpolmodellierung der Teilschalldruck überschätzt. Bei den leichteren und steiferen Fahrwerkslagern sind bis zu 1000 Hz keine markanten Schalldruck-Differenzen zwischen den Rechnungen mit und ohne Vierpolmodellierung festzustellen.

#### Literatur

- [1] **E. Seidel:** *Wirksamkeit von Konstruktionen für Schwingungs- und Körperschalldämmung in Maschinen und Geräten*, Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss., Bremerhaven (1999).
- [2] **B. Martyn:** *Geräuschpfadanalyse einer PKW-Hinterachse mittels der Vierpol-Methode*, Diplomarbeit TU Hamburg-Harburg, Hamburg (2000).