

# Der Einsatz von (in-)direkten Messverfahren und Berechnungen zur Charakterisierung und Quantifizierung von Körperschallquellen im Design-Prozeß von Schienenfahrzeugen

Karl-Richard Fehse<sup>1</sup>, Torsten Kohrs<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bombardier Transportation, Specialist Engineering, Mainline & Metros, 16761 Hennigsdorf, Deutschland,  
Email: [karl-richard.fehse@de.transport.bombardier.com](mailto:karl-richard.fehse@de.transport.bombardier.com), [torsten.kohrs@de.transport.bombardier.com](mailto:torsten.kohrs@de.transport.bombardier.com)

## Einleitung

Der prinzipielle akustische Designprozeß (1. Akustische Spezifikation & Kunden-Anforderungen; 2. Pre-/Konzept-Design; 3. Design / Realisierung & Modellierung; 4. Test- & Validierung; 5. Produktion) ist durch einen permanenten Bezug auf Schallquellen und -übertragungswege gekennzeichnet. Der Quellenbezug ist praktisch in jeder einzelnen Design-Phase gegeben: beispielhaft seien nur die Auswahl der Feld- oder Energiegrößen (Einzahlwerte oder Spektren) in der Anforderungsphase und die Quellenquantifizierung und -rangfolge sowie das Schallflussdiagramm in der Realisierungsphase genannt. Die Charakterisierung und Quantifizierung von Körperschallquellen scheint auf den ersten Blick schwieriger und konzeptionell völlig anders zu sein als die von Luftschallquellen, weil hier die Schalleistung allein ausreichend erscheint:

$$L_W = L_p + L_S \quad (1)$$

Die Gleichung beschreibt die Schalleistungsbestimmung  $L_W$  auf der Basis einer Schalldruckmessung  $L_p$  ( $L_S$  Flächenmaß). Die Schalleistung enthält jedoch den Bezug zu Schallfeldimpedanz  $Z$  bzw. Schallfeldadmittanz  $Y$ :

$$P = p * v S ; P = \left( \frac{p^2 S}{Z} \right) \text{ bzw. } P = p^2 S Y ; \quad (2)$$

(Schalleistung  $P$ ; Effektivwerte Druck  $p$  u. Schnelle  $v$ ; \* konjugiert komplex) mit

$$Z = \frac{p}{v} \text{ bzw. } Y = \frac{v}{p} \quad (3)$$

Dies bewirkt beispielsweise für einen Temperaturwechsel (z.B. 20 °C auf 0 °C) und eine Druckänderung (z.B. 1013 mbar auf 1030 mbar) lediglich eine Änderung um ca. 0.3 dB. Ein Gaswechsel (z.B. Helium statt Luft) bewirkt bereits eine Änderung um ca. 4 dB. Die Charakterisierung von Luftschallquellen erfolgt also durch eine Kombination von Feldgrößen (Druck  $p$  u. Schnelle  $v$ ) und Admittanz  $Y$ . Das Quellen-Konzept gleicht folglich dem für die Charakterisierung von Körperschallquellen (Körperschalleistung  $P$ ; Effektivwerte Kraft  $F$  & Schnelle  $v$ ; \* konjugiert komplex):

$$P = F * v ; P = |F|^2 Y ; P = \frac{|v|^2}{Y^*} = \frac{|v|^2}{|Y|^2} Y \quad (4)$$

Ein Wechsel von Platte (1cm Dicke, Stahl, 100 Hz)  $Y_{Platte}$  zu Balken (1cm x 1cm, Stahl, 100 Hz)  $Y_{Balken}$  bewirkt bei

gleicher Kraft eine Pegeldifferenz von ca. 15 dB. Konzeptionell gilt ähnliches für die Beschreibung der Luftschall- und Körperschallübertragung: daß die Einfügungsdämmung  $\Delta L_1$  – und beispielsweise nicht die Pegeldifferenz vor und nach dem Schalldämpfer – den prakti-

$$\Delta L_1 = 10 \log 10 \left( \frac{P_{\text{ohne Schalldämpfer}}}{P_{\text{mit Schalldämpfer}}} \right) \quad (5)$$

schon Schalldämpfereinsatz am besten beschreibt, kann man nur verstehen, wenn die Quellmobilität berücksichtigt wird. Es gilt prinzipiell sowohl für Luftschall und Körperschall, daß die interessierende Übertragung zwischen Quelle und Empfänger nicht nur von den Quelleigenschaften abhängt, sondern ein Zusammenspiel zwischen den akustischen Eigenschaften beider Systeme (Quelle & Empfangsstruktur) darstellt.

## Methoden zur Bestimmung der Körperschallübertragung

Zielgröße für die Quantifizierung der Körperschallübertragung in den Wagenkasten ist die übertragene Körperschalleistung  $P_R$ , die mit Hilfe der Kopplungsgrößen für den (eher akademischen) Fall der Ein-Freiheitsgrad-Kopplung aus Kraft  $F_R$  und Schnelle  $v_R$  bestimmt werden kann (Index R für Empfangsstruktur, Re Realteil):

$$P_R = \text{Re} \{ F_R^* v_R \} \quad (6)$$

**Direkte Messverfahren:** sowohl Schnelle  $v_R$  als auch Kraft  $F_R$  können direkt (Schnelle-, Beschleunigungs-, Kraftaufnehmer) gemessen werden. **Indirekte Messverfahren:** 'komplexe Steifigkeitsmethode' und 'Inverse Matrixmethode' *IM*.  $F_R$  wird bei der ersten Methode aus der komplexen Steifigkeit der Isolationselemente und der Wegdifferenz (quell- und empfangsstrukturseitig) bestimmt. Die zweite Methode verknüpft Mobilitätsmatrix und Schnelle.

### Betrieb der Quelle

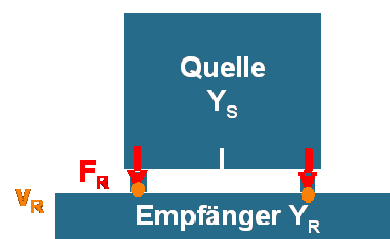


Abbildung 1: Prinzipbild für ein Quelle-Empfänger System

### Anwendungsszenario

**Gesucht:** Induzierte Körperschall-Leistung  $P_R$ , Kräfte  $F_R$  und/oder Schnellen  $v_R$

**Grenzen:** Die Quelle (z.B. Dieselmotor) kann nicht im neuen Zug vermessen werden: Prüfstandsmessungen !

**Gegeben:** Neuer Zug ! Berechnung/Messung der vollständigen Mobilitätsmatrix (z.B. FE-Analysis)

### Eine Lösung:

$$P_{NewStructure} = F_{NewStructure}^* v_{NewStructure} = |F_{NewStructure}|^2 Y_{NewStructure} \quad (7)$$

$$P_{NewStructure} = \frac{|v_{NewStructure}|^2 Y_{NewStructure}}{|Y_{NewStructure}|^2} = G_{Fv}$$

mit  $G_{Fv}$  Kreuzspektrum

$$F_{NewStructure} = (Y_{Source} + Y_{NewStructure})^{-1} Y_{Source} F_{Blocked} \quad (8)$$

wobei

$$Y_{Source} = \frac{v_{Free}}{F_{Blocked}} \quad (9)$$

Damit kann die induzierte Kraft  $F_R$  auch über die freie Schnelle definiert werden:

$$F_{NewStructure} = (Y_{Source} + Y_{NewStructure})^{-1} v_{Free} \quad (10)$$

D.h., daß zusätzlich zur Mobilitätsmatrix der Empfangsstruktur, die Mobilität der Quelle  $Y_{Source}$  sowie die blockierte Kraft  $F_{Blocked}$  ( $v=0$ ) bzw. die freie Schnelle  $v_{Free}$  ( $F=0$ ) benötigt werden. Diese -die Quelleigenschaften und -aktivität beschreibenden Größen- müssen ebenso in die akustische Datenbank übernommen werden wie die Mobilitätsmatrix der Empfangsstruktur.

### Prüfstandsmessung:

Die blockierte Kraft wird auf dem Prüfstand mittels gemessener Prüfstandssystem-Mobilitätsmatrix  $Y_{TestRigSystem}$  und  $v_{TestRig}$  Prüfstandsschnelle ermittelt:

$$F_{Blocked} = Y_{TestRigSystem}^{-1} v_{TestRig} \quad (11)$$

Die Prüfstandssystem-Mobilitätsmatrix  $Y_{TestRigSystem}$  setzt sich aus der Mobilität der Quelle  $Y_{Source}$  und der Prüfstands-Mobilitätsmatrix  $Y_{TestRig}$  zusammen:

$$Y_{TestRigSystem} = (Y_{Source}^{-1} + Y_{TestRig}^{-1})^{-1} \quad (12)$$

Für die Vorhersage des Körperschallverhaltens sind folglich die drei Variablen  $P_{NewStructure}$ ,  $F_{NewStructure}$  &  $v_{NewStructure}$  erforderlich.:

$$Y_{NewStructure}, Y_{Source} \text{ \& } F_{Blocked} \text{ (bzw. } v_{Free} \text{)} \quad (13)$$

Wird die Kraft auf dem Prüfstand gemessen, muss sie wie folgt umgerechnet werden:

$$F_{Blocked} = \frac{(Y_{Source} + Y_{TestRig})}{Y_{Source}} F_{TestRig} \quad (14)$$

Die gemessene Kraft ist der blockierten Kraft nur unter der folgenden Voraussetzung gleich:

$$F_{Blocked} \approx F_{TestRig}, \text{ wenn } Y_{TestRig} \ll Y_{Source} \quad (15)$$

### Beispielergebnisse für ein Diesel-Antriebsaggregat:

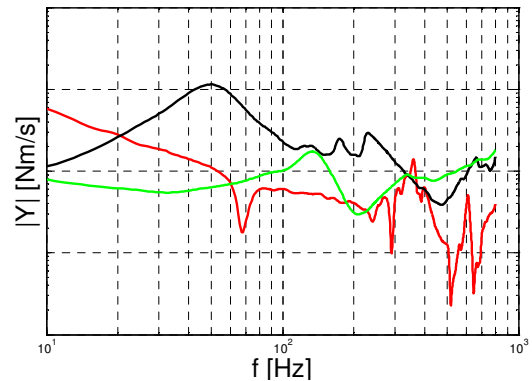


Abbildung 2: Gemessene Mobilitäten (z-Richtung)  $Y_{TestRig}$  (rot),  $Y_{Source}$  (schwarz) und  $Y_{Train}$  (grün)

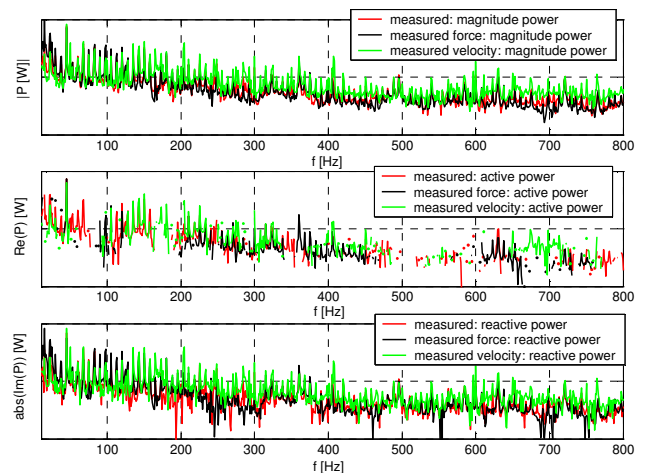


Abbildung 3: Körperschalleistungs-Übertragung (log. Skala) im Diesel TestRig – drei verschiedene Berechnungen (Gleichung (4): rot: 1. Teil (F & v), schwarz: 2. Teil (F &  $Y_{TestRig}$ ), grün: 3. Teil (v &  $Y_{TestRig}$ ). Betrag (oben), Wirkleistung (Mitte) und Blindleistung (unten)

### Literatur

- [1] B.A.T. Petersson, B.M Gibbs: Towards a structure-borne sound source characterization. Applied Acoustics 61 (2000), 325-343
- [2] L. Cremer, M. Heckl, B.A.T. Petersson: Structure-borne sound., 3rd edition, Springer, Berlin, 2005