

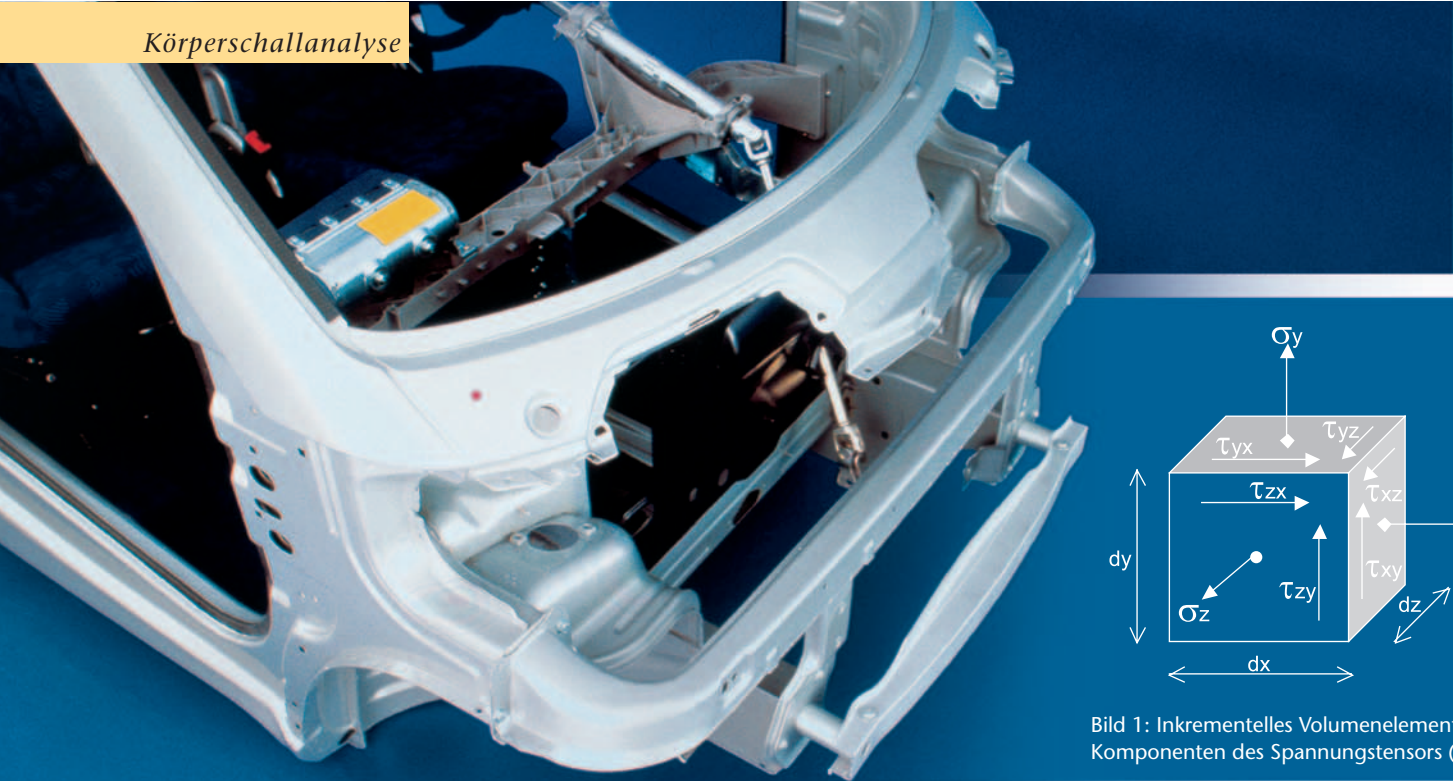


Bild 1: Inkrementelles Volumenelement mit Komponenten des Spannungstensors (s. Gl. 1).

Quellen und Senken

Berechnung der Körperschallintensität von Autokarosserien aus Laser Scanning-Messungen

Die Automobilentwickler versuchen, die Innenraumgeräusche mit den Kräften zu korrelieren, die an Motor- und Chassisverbindungen einwirken. Die Festkörperphysik ist zwar weitaus komplizierter als die gut erforschte Akustik der Fluide, jedoch kann hier die Laservibrometrie, sofern sich die Anwendung auf dünne Platten beschränkt, ideal eingesetzt werden. Am Beispiel eines Fahrzeugdachs wird eine Intensitätsanalyse solcher Körperschalleffekte vorgestellt.

$$\begin{aligned} \text{Gl. 1} \quad J_x &= -\left[\overline{\sigma_x v_x} + \overline{\tau_{xy} v_y} + \overline{\tau_{xz} v_z}\right] \\ J_y &= -\left[\overline{\tau_{xy} v_x} + \overline{\sigma_y v_y} + \overline{\tau_{yz} v_z}\right] \\ J_z &= -\left[\overline{\tau_{xz} v_x} + \overline{\tau_{yz} v_y} + \overline{\sigma_z v_z}\right] \end{aligned}$$

$$\text{Gl. 4} \quad \text{div} J_a = \frac{\partial J_{a,x}}{\partial x} + \frac{\partial J_{a,z}}{\partial z} = \nabla J_a$$

$$\text{Gl. 2} \quad P_x(t) = B \cdot \left[\left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} \right) \cdot \frac{\partial \dot{\eta}}{\partial x} + (1 - \mu) \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial z} \cdot \frac{\partial \dot{\eta}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} \right) \cdot \dot{\eta} \right]$$

$$B = E \frac{h^2}{12}; \quad \eta \mapsto \text{out of plane movement} \quad E, \mu \mapsto \text{Youngs modulus, poisson ratio}$$

$$\text{Gl. 3} \quad P_x(\Omega) = B \cdot \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial \dot{\eta}^*}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} \cdot \frac{\partial \dot{\eta}^*}{\partial z} + (1 - \mu) \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial z} \cdot \frac{\partial \dot{\eta}^*}{\partial z} - \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \cdot \dot{\eta}^* - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} \right) \cdot \dot{\eta}^* \right\}$$

Die Grundgleichung der Intensität

Die Schallintensität entspricht einem Energiefluss in Vektorform. Das mechanische Modell der Intensität (aus der Kontinuumsmechanik) basiert auf den Größen Dehnung und Spannung. In einem Festkörper sind dies Tensoren mit gewöhnlich sechs unabhängigen Werten, jeweils drei in Normal- und drei in Scherrichtung (Bild 1).

Das Produkt aus Geschwindigkeit und Kraft ist die Leistung. In der Kontinuumsmechanik ergibt das Produkt der entsprechenden Tensoren die Intensitätsvektoren in drei Raumrichtungen.

Jede Komponente J_i des Intensitätsvektors besteht aus der Summe dreier Terme, die das Zeitmittel der Normal- und Scherspannungen wiedergeben.

Die Physik des Körperschalls in Platten

Bisher ist es nicht möglich, Spannung und Dehnung nach Gl. 1 innerhalb eines Festkörpers zu messen, deshalb kann diese allgemeine Gleichung nur z. B. in CAE-Berechnungen verwendet werden. Experimentelle Untersuchungen beschränken sich auf Platten, bei denen

eine Extrapolation der Biegeverformung an der Oberfläche (gemessen mit einem Scanning Vibrometer) in das Festkörperinnere möglich ist. Eine Integration der out-of-plane-Komponenten über die Plattendicke ergibt die Leistung in x-Richtung (Gl. 2). Der nächste Schritt betrifft den zeitlichen Mittelwert des Produkts zweier dynamischer Variablen $y(t) = x_1(t) \cdot x_2(t)$. In der Zeitdomäne oszillieren beide Variablen mit derselben Frequenz. Damit kann man die zeitlich gemittelte Intensität aus den in der Frequenzdomäne gemessenen Spektren berechnen (Gl. 3). Der Realteil steht für die aktive Intensität, während der Imaginärteil als reaktive Intensität bekannt ist und die Energie beschreibt, die sich über die Oberfläche hin- und herbewegt, sich aber im zeitlichen Mittel nicht verändert.

MATLAB-Implementierung

Für die Auswertung wurde ein über Benutzerschnittstellen bedienbares MATLAB-Programm entwickelt. Dieses importiert zunächst den Scanning Vibrometer-Datensatz mit den Mobilitätsfunktionen und Koordinaten des Messgitters. Nach einigen Integritätsprüfungen wird aus den Daten eine gemittelte Frequenzübertragungsfunktion (FRF) erzeugt. Für die Analyse wählt man dann eine Frequenz aus, deren FRF als 3D-Schwingform über dem Messgitter dargestellt wird.

Nach der Prüfung der Messdaten wird die Analyse der gewählten Frequenzlinie durchgeführt. Das Ergebnis wird entweder als Vektor- oder Divergenzplot dargestellt. Insbesondere die Divergenz ist ein effektives Werkzeug, um Quellen und Senken der Energie zu finden (Gl. 4).

erreichen, wurde eine rechteckige Bitumenfolie an der unteren linken Ecke als Dämpfung aufgebracht. Die Dissipation (Bild 3) erfolgt in einer etwas diffuseren Weise als in dem simulierten Experiment.

Als Beispiel aus der Praxis wurde ein Fahrzeugdach durch Abtrennen an den A-, B- und C-Säulen präpariert (Bild 4), an Gummiseilen aufgehängt und im oberen rechten Quadrant mit einer Dämmplatte versehen.

In Bild 5 ist der Energieeintrag des Shakers an der linken unteren Ecke klar zu erkennen. Die Dämmplatte zeigt jedoch keinen signifikanten Effekt, weil das Dach in der Mitte zwischen den B-Säulen einen Querträger enthält, der wie eine Barriere für die Schallwellen wirkt. So erreicht nur ein geringer Anteil der Energie den oberen Teil des Dachs.

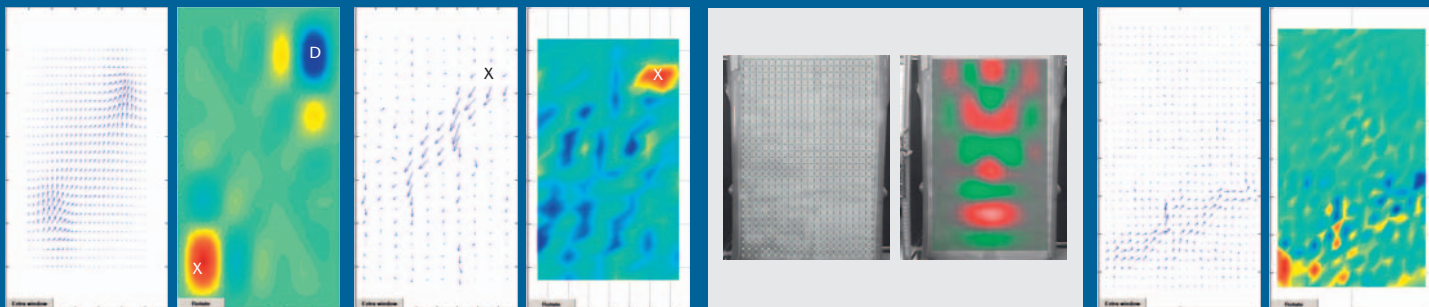


Bild 2: Intensität, simulierte Platte (X: Anregung; D: Dämpfung)

Bild 3: Intensität, reale Platte (X: Anregung)

Bild 4: Scanning Vibrometer-Messung am Fahrzeugdach

Bild 5: Intensität am Fahrzeugdach

Gl. 3 enthält Ableitungen bis zur 3. Ordnung sowie gemischte Ableitungen, die zur Bestimmung der Intensitätsterme benötigt werden. Die in der Modalanalyse üblichen Techniken können jedoch keine räumlichen Ableitungen direkt messen – ein wirklich schwieriger Punkt der Methode. Mithilfe der Scanning Vibrometer-Messungen auf einem Punktraster können die Messwerte separat in x- und y-Richtung der Oberfläche interpoliert werden. Die höheren Ableitungen werden schließlich numerisch abgeschätzt, entweder über kubische Splines oder harmonische Funktionen.

Experimentelle Ergebnisse

Bei der Anregung einer Struktur findet ein Energiefluss statt, sofern eine Senke z. B. in Form einer Dämpfung vorhanden ist. Dies wurde zunächst an einer simulierten Platte (700 mm x 1100 mm x 1 mm) mit einer punktförmigen Dämpfung untersucht. Sowohl das Vektorfeld der aktiven Intensitäten als auch seine Divergenz zeigen das erwartete Verhalten (Bild 2).

Als nächstes wurde eine an Gummiseilen aufgehängte Stahlplatte mit dem PSV Scanning Vibrometer auf einem Messgitter mit 21x10 Punkten gemessen. Um einen definierten Energiefluss zu

Schlussfolgerung

Bei der Optimierung von Karosseriedämpfungen zur Verbesserung der Schallübertragung ermöglicht die Scanning-Vibrometrie eine sehr effektive Intensitätsanalyse. Der Vorteil von Intensitätsbestimmungen gegenüber Schalldruckmessungen besteht darin, dass die Intensität den Energiefluss abbildet und somit wesentlich tiefergehende Lösungsansätze bietet.

Diese Arbeit wurde am Ford Acoustic Centre Cologne mit Unterstützung von Martin Flick durchgeführt.

Bienert.Joerg@Siemens.com