

Räumliche dynamische Simulation von Leitungssystemen

Matthias Maess¹, Lothar Gaul¹, Michael Fischer², Hans-Georg Horst²

¹ Institut für Angewandte und Experimentelle Mechanik, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart

Email: {maess,gaul}@mecha.uni-stuttgart.de

² Robert Bosch GmbH, Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung, Angewandte Physik,
Robert-Bosch-Platz 1, 70839 Gerlingen-Schillerhöhe

Einleitung

Durch gestiegene Anforderungen an das akustische Verhalten von Fahrzeugen rücken auch verstärkt Einzelkomponenten in das Blickfeld der dynamischen Untersuchungen. Leitungen von hydraulischen Systemen im Fahrzeug stellen hierbei mögliche Übertragungspfade dar. Durch Ventilbetätigung oder Pumpenbetrieb breiten sich stark gekoppelte Wellen im Fluid und in der Leitungsstruktur aus [1], die auch angrenzende Strukturkomponenten zu unerwünschten Schwingungen anregen können. Um allen räumlichen Bewegungen und dem Charakter der Akustik-Struktur-Kopplung Rechnung zu tragen, werden voll gekoppelte FE-Modelle in drei Dimensionen verwendet.

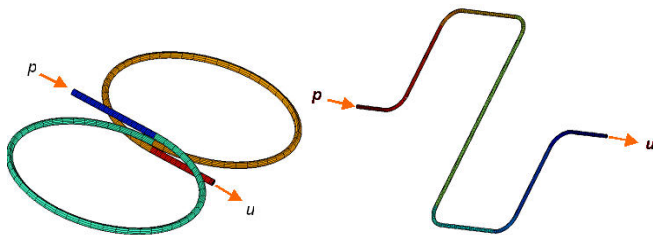


Abbildung 1: Substrukturtechnik zur Assemblierung alternativer Leitungsverlegungen aus 4 (links) bzw. 13 Komponenten (rechts).

Substrukturtechnik

Bei der Berechnung der Leitungsdynamik werden prinzipiell zwei Anforderungen an eine Simulationsmethode gestellt: Zum einen sollen transiente Analysen ermöglicht werden. Außerdem sollen räumliche Berechnungen bei möglichst hohen Frequenzen erfolgen, was die üblichen Probleme eines Diskretisierungsverfahrens in 3D nach sich zieht. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wird eine Substrukturtechnik vorgeschlagen, bei der typische fluidbefüllte Leitungskomponenten als reduzierte dynamische Modelle im Zeitbereich aus vollen 3D-FE-Modellen erstellt werden. Diese Vorgehensweise gestattet es, neben den Leitungskomponenten auch geometrisch komplexere Komponenten wie Lager und angrenzende Strukturkomponenten in die Leitungsmodelle einheitlich zu integrieren. Außerdem können mehrfach existierende Substrukturen wiederholt eingebaut werden (Abbildung 1). Ein Problem bei der Modellreduktion sind die aufgrund der Akustik-Struktur-Kopplung nichtsymmetrischen FE-Matrizen [2], deren numerische Behandlung im Vergleich

zu symmetrischen Gleichungen aus der Strukturdynamik eine besondere Behandlung erfordert. Hierbei wird der Ansatz eines modifizierten Craig-Bampton-Verfahrens [3] verwendet, wobei jedoch der voll gekoppelte Eigenraum in die Reduktionsbasen aufgenommen wird, um dem Charakter der Akustik-Struktur-Kopplung Rechnung zu tragen. Es existieren zwei Alternativen: Ein einseitiges Verfahren verwendet die Reduktionsbasis auch als Projektionsbasis [4], wohingegen ein zweiseitiges Craig-Bampton-Verfahren genauere Approximationen erzielt und die Möglichkeit der Fehlerkompensation durch *Modal Truncation Vectors* bietet [5]. Das einseitige Verfahren arbeitet jedoch numerisch unbedingt stabil und wird deshalb in den folgenden Untersuchungen verwendet.

Dämpfungsmodell

In dünnen Hydraulikleitungen mit mittleren Radien von 2-3mm ist der Dämpfungseinfluss im Fluid von entscheidender Bedeutung. Als physikalischer Mechanismus bei den longitudinalen akustischen Moden ist hierfür insbesondere die frequenzabhängige Ausbildung von Geschwindigkeitsprofilen verantwortlich, wobei die Fluidpartikel auf der Rohrwand als haftend angenommen werden. Um aus diesem Dämpfungsmodell [6] für das Fluid eine lineare frequenzabhängige Dämpfungsmatrix zur Integration in die reduzierten dynamischen Gleichungen zu gewinnen, wird für die longitudinale Wellenbewegung ein analytisches Modell aufgestellt. Aus diesem wird anschließend eine frequenzabhängige komplexe Wellenzahl berechnet. Diese dient nun zur Umrechnung in frequenzabhängige modale Dämpfung (Abbildung 2). Es ist somit möglich, eine frequenzabhängige Dämpfungsmatrix zu berechnen, die den Dämpfungsverlauf an den Eigenfrequenzen der akustischen Longitudinalschwingungen interpoliert. Das Dämpfungsmodell braucht außerdem nur in reduzierten modalen Koordinaten formuliert werden.

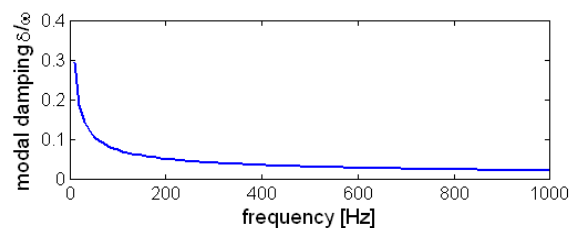


Abbildung 2: Frequenzabhängige modale Dämpfung.

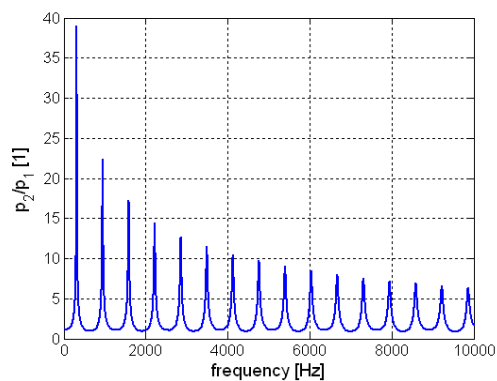


Abbildung 3: Hydraulische Übertragungsfunktion in einer geraden Leitung.

Die Erfassung dieses Dämpfungseinflusses ist von entscheidender Bedeutung, um die recht hohe Fluiddämpfung bei niederen Frequenzen ausreichend wiedergeben zu können. In Abbildung 3 ist die Simulation eines Amplitudengangs in einem geraden Rohrsegment dargestellt. Es erfolgt eine harmonische Druckanregung am linken Rand, während der akustische Druck am rechten Rand als Ausgang gewählt wird.

Anwendungsgebiete

Mit Hilfe der neuartigen Simulationstechnik werden u.a. folgende Problemstellungen zum vibroakustischen Verhalten von Hydraulikleitungen behandelt:

- Untersuchungen von alternativen Leitungsverlegungen sollen klären, ob bestimmte Leitungsanordnungen unter Einbeziehung von Krümmern, Schlaufen und passiven Krafterelementen die Möglichkeit zur Schalldämmung bzw. Energiedissipation bieten. Zur Zeit werden vibroakustische Analysen von Einfach-Anordnungen durchgeführt (Abbildung 1).
- Von besonderem Interesse ist die Analyse der dynamischen Anregung von Strukturkomponenten, die über Halterungen mit dem Leitungssystem verbunden sind. Diese oftmals großflächigen Zielstrukturen, wie beispielsweise Karosseriekomponenten, besitzen ein hohes Potential zur Schallabstrahlung ins Fernfeld. Durch Simulationen lassen sich lokale und globale Schwingungsformen (Abbildung 4) sowie die Höhe der Anregung erfassen. Die globale Mode (rechts) wird im Gegensatz zur lokalen Mode (links) stark angeregt. Zur experimentellen Untersuchung dieser Problemstellung wurde von der Robert Bosch GmbH ein Prüfstand entwickelt (Abbildung 5). Kernstück ist eine hochdynamische Pulsationsquelle, die eine hydroakustische Schall-wandlung mittels Piezo-Stackaktuatoren bewirkt.
- In der Zukunft sollen alle Einzelmaßnahmen vor dem Hintergrund der passiven Schallminderung aufeinander abgestimmt und gegebenenfalls optimiert werden. Die effiziente Simulationstechnik mittels Substrukturtechnik ermöglicht durch ihren Baukastencharakter eine effiziente Implementierung.

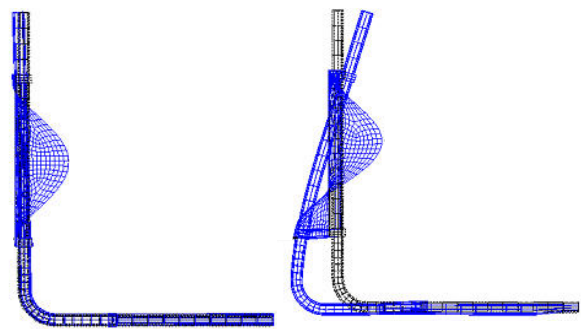


Abbildung 4: Lokale (links) und globale (rechts) Schwingungsmoden einer fluidbefüllten Leitung und einer Zielstruktur.

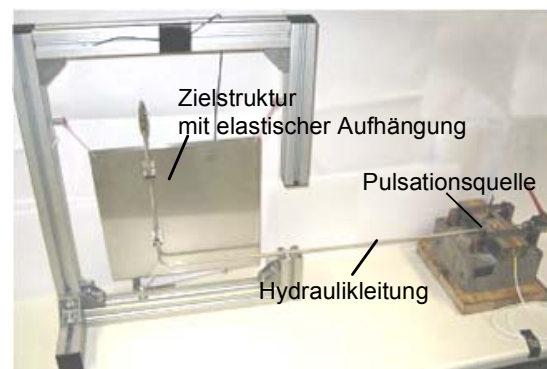


Abbildung 5: Leitungsprüfstand der Robert Bosch GmbH, Schillerhöhe, mit einer Zielstruktur und einer hydroakustischen Pulsationsquelle.

Förderung

Diese Arbeit wird von der DFG im Rahmen des Transferbereichs 51 "Simulation und aktive Regelung der Hydroakustik in flexiblen Leitungen" gefördert.

Referenzen

- [1] Fuller, C. H.; Fahy, F.J.: Characteristics of wave propagation and energy distribution in cylindrical elastic shells filled with fluid. *Journal of Sound and Vibration* **81**,501-518,1982.
- [2] Zienkiewicz, O.C.; Taylor, R.L.: *The Finite Element Method*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002.
- [3] Craig, R.J.; Bampton, M.C.C.: Coupling of substructures for dynamic analysis. *AIAA Journal* **6** (1968),1313-1319.
- [4] Maess, M. and Gaul, L.: Substructuring and model reduction of pipe components interacting with acoustic fluids. *Mechanical Systems and Signal Processing* **20**, 45-64, 2006.
- [5] Maess, M. and Gaul, L.: Component Mode Synthesis for efficient acoustic-structure simulation of piping systems. *International Modal Analysis Conference XXIV*, St. Louis, CD-ROM, 1-9, 2006.
- [6] Theissen, H.: Die Berücksichtigung instationärer Rohrströmung bei der Simulation hydraulischer Anlagen. Dissertation, RWTH Aachen, 1983.