

## Experimentelle Untersuchung der Hydroakustik in Kfz-Leitungssystemen

Jan Herrmann<sup>1</sup>, Thomas Haag<sup>1</sup>, Lothar Gaul<sup>1</sup>, Karl Bendel<sup>2</sup>, Hans-Georg Horst<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Angewandte und Experimentelle Mechanik, Universität Stuttgart, 70550 Stuttgart, Deutschland

Email: {herrmann,gaul}@iam.uni-stuttgart.de

<sup>2</sup> Robert Bosch GmbH, Corporate Sector Research and Advance Engineering, Structural and Contact Dynamics  
Robert-Bosch-Platz 1, 70839 Gerlingen, Deutschland

### Einleitung

In fluidbefüllten Leitungen im Fahrzeugbau wird aufgrund von Pumpenförderung und Ventilbetätigungen Hydroschall erzeugt, der wiederum die Leitungsstruktur sowie angekoppelte Strukturelemente zu Schwingungen anregt [1, 2]. Um unerwünschte Schallemissionen zu minimieren, wird zunächst ein genaues Verständnis über das Systemverhalten und mögliche Übertragungspfade im fluidmechanischen System angestrebt. Dazu wird ein Prüfstand mit einer innovativen Pulsationsquelle für Dynamikmessungen an für Kfz typischen Hydraulikleitungen vorgestellt. Die experimentellen Ergebnisse werden mit Simulationen verglichen, die die Fluid-Struktur-Kopplung mit einbeziehen. Von besonderem Interesse ist die Auswirkung von Druckpulsationen auf die Leitungsstruktur und Anbauteile. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden auf die Verbesserung der Leitungsanordnung und Aufhängung in der Praxis im Hinblick auf Schwingungs- und Geräuschreduktion angewendet.

### Experimenteller Aufbau

Der Rohrleitungsprüfstand für die Untersuchung von fluidbefüllten Kfz-Leitungssystemen besteht im Wesentlichen aus einer hydroakustischen Pulsationsquelle, einer Hydraulikleitung sowie einer elastisch aufgehängten Platte als Zielstruktur, die über zwei Stahlclips mit der Leitung verbunden ist (Abbildung 1). Als Hydraulikleitung wird eine gekrümmte Stahlbremsleitung ( $E=206$  GPa,  $\rho_s=7900$  kg/m<sup>3</sup>, Längen 0,7 m + 0,3 m) mit einem Durchmesser von 6 mm verwendet. Die Leitung ist mit Wasser ( $c_f=1460$  m/s,  $\rho_f=1000$  kg/m<sup>3</sup>) befüllt. Die dynamische Pulsationsquelle besteht aus zwei Piezo-Stapelaktuatoren, die von einem Leistungsverstärker angesteuert werden und senkrecht zur Wellenausbreitungsrichtung und auf gegenüberliegenden Seiten der Leitung angeordnet sind. Die gegenphasige Auslenkung der Piezo-Aktuatoren erzeugt Druckpulsationen innerhalb der fluidbefüllten Leitung. Neben einer Messleitung verfügt der Prüfstand über eine Zuleitung für die Befüllung und Verdichtung des Fluids mittels Handpumpe. Das Gehäuse des Hydropulsers übernimmt die Funktion der Lagerung und Abdichtung der Piezos und ist dabei so konstruiert, dass der überwiegende Teil des Hydroschalls in der Messleitung erzeugt wird. Für die experimentelle Bestimmung der hydraulischen Resonanzen wird eine Sweepearregung gewählt. Die dynamischen Drücke  $p_1$  und  $p_2$  am Leitungsanfang bzw. am Leitungsende werden mit piezoelektrischen Drucksensoren gemessen.

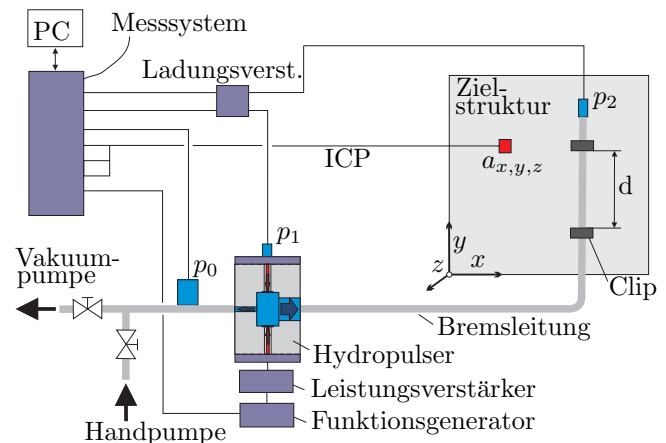


Abbildung 1: Schema des hydroakustischen Leitungsprüfstands.

sen. Aus den gemessenen Drucksignalen (30 Mittelungen) wird anschließend die hydraulische Übertragungsfunktion bestimmt. Von entscheidender Bedeutung ist dabei eine luftfreie Befüllung der Leitung sowie ein ausreichend hoher statischer Druck  $p_0$ , so dass die Flüssigkeit ausreichend komprimiert und die Luft vollständig in Lösung ist. Bei der vorliegenden Messung beträgt der statische Druck mindestens  $p_0=35$  bar. Das maximale Pulsationsniveau bzw. die dynamische Druckamplitude liegt am Leitungsanfang bei  $p_1=5$  bar und am Leitungsende bei  $p_2=10$  bar. Für die Messung des Körperschalls auf Leitungs- und Zielstruktur wird ein dreidimensionaler Beschleunigungsmesser ( $a_{x,y,z}$ ) verwendet. Auf diese Weise ist es möglich, die aus den Druckpulsationen im Fluidpfad angeregten Strukturschwingungen messtechnisch zu erfassen. Insbesondere die Anregung von Biegeschwingungen der Zielstruktur führt zu hohen Schnellepegeln und folglich zu störenden Geräuschen.

### Modellierung des Leitungssystems

Um den hohen Rechenaufwand bei komplexen, räumlichen Leitungssystemen zu verringern, werden Techniken zur Substrukturkopplung und Modellreduktion eingesetzt. Als besonders geeignetes Reduktionsverfahren hat sich die Adaption der Craig-Bampton-Methode [3] auf Fluid-Struktur gekoppelte Systeme erwiesen [1]. Um die starke Wechselwirkung zwischen Fluid- und Körperschall zu berücksichtigen, werden die diskretisierten Fluid- und Strukturpartitionen über ein akustisches Interface voll gekoppelt [2]. Die Diskretisierung der einzelnen Substrukturen erfolgt mit Hilfe der Finite Elemente Methode

(FEM). Nach der Assemblierung der reduzierten Substrukturen erfolgt die harmonische Analyse des gekoppelten Leitungssystems mittels modaler Superposition. Durch den dreidimensionalen Modellierungsansatz ist es möglich, räumliche Leitungsbewegungen und insbesondere die in der Praxis wichtigen Biegeschwingungen gekoppelter Leitungssysteme zu erfassen. Das betrachtete fluidbefüllte Bremsleitungssystem wird aus insgesamt 8 Substrukturen zusammengesetzt, wobei eine Modellordnungsreduktion um einen Faktor 20 von 55899 auf 2683 Freiheitsgrade erreicht wird.

## Experimentelle Ergebnisse und numerische Simulation

Die gemessene hydraulische Übertragungsfunktion  $H_{p_1 \rightarrow p_2}$  ist in Abbildung 2 dargestellt. In derselben Abbildung ist das Ergebnis der numerischen Simulation zu sehen. Sowohl die hydraulischen Resonanzstellen als auch die Dämpfung im Fluidpfad stimmen sehr gut überein. Das in der Simulation verwendete Dämpfungsmodell beruht auf einer komplexen Wellenzahl und schließt die Wandreibung zwischen Fluid und Leitungswand mit ein [4]. Bei der dritten hydraulischen Resonanzstelle ist die Wechselwirkung zwischen Fluid und Struktur besonders ausgeprägt, was in einer gekoppelten Mode mit Antiresonanz resultiert. Die Erklärung hierfür ist das Zusammenfallen von Strukturresonanz und hydraulischer Resonanz. Durch die Druckpulsationen im Fluid wird die Leitung zu Schwingungen angeregt, die über die Clipse auf die Zielstruktur übertragen werden. Um den gemessenen Körperschall an der Zielstruktur zu minimieren, wird der Abstand der beiden Clipse variiert und die Schallschnelle an der Platte ausgewertet. In Abbildung 3 ist zu sehen, wie sich ein ungünstig gewählter Abstand der beiden Koppelstellen auf die Schwingungsform auswirkt. Sobald sich ein Clip auf einem Schwingungsbauch bzgl. einer Biegemode der Zielstruktur befindet, findet eine starke Schwingungsübertragung zwischen Leitung und Anbaustruktur statt, die es letztlich zu verhindern gilt. Für den vorliegenden Referenzfall und den betrachteten

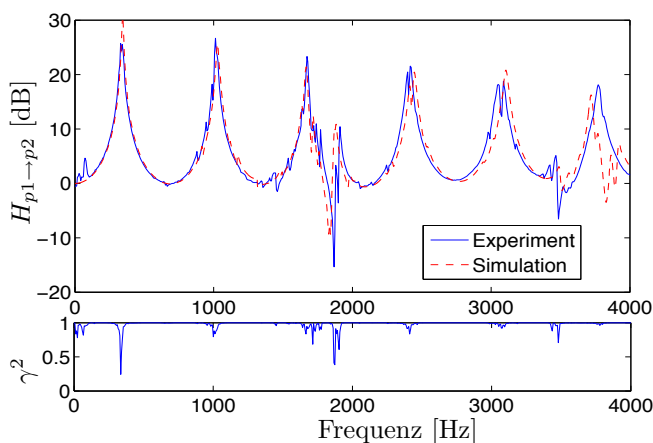


Abbildung 2: Hydraulische Übertragungsfunktion  $H_{p_1 \rightarrow p_2}$  (oben) und Kohärenz  $\gamma^2$  (unten).

Frequenzbereich (bis 4 kHz) führen Clipabstände von  $d=0,05$  m und  $d=0,14$  m zur geringsten Schallschnelle an der Zielstruktur, während der ungünstigste Abstand der Koppelstellen bei  $d=0,12$  m liegt und im nahezu gesamten Frequenzbereich zu den größten gemessenen Schwingungsamplituden führt.

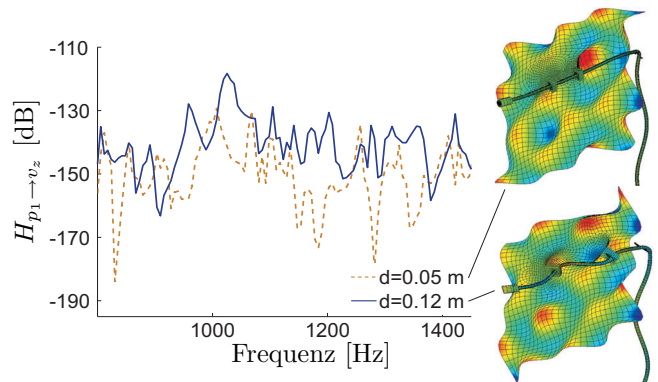


Abbildung 3: Gemessene Übertragungsfunktion  $H_{p_1 \rightarrow v_z}$  und Schwingungsformen des Leitungssystems bei einer Frequenz von 1030 Hz für verschiedene Clipabstände.

## Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Leitungsprüfstand ist es möglich, hydraulische Übertragungsfunktionen messtechnisch zu bestimmen und die Wechselwirkung zwischen Fluidschall und Körperschall zu untersuchen. Durch die Variation der Lage der Kopplungsstellen zwischen Rohrleitung und Zielstruktur wird eine Verbesserung des Schwingungsverhaltens und eine Geräuschreduktion des Leitungssystems erreicht. Die experimentellen Ergebnisse werden durch die 3D-Simulation des Leitungssystems bestätigt.

## Förderung

Die vorliegende Arbeit wird von der DFG im Rahmen des Transferbereichs 51 *Simulation und aktive Beeinflussung der Hydroakustik in flexiblen Leitungen* gefördert.

## Literatur

- [1] Maess, M.: Methods for Efficient Acoustic-Structure Simulation of Piping Systems. Dissertation, Institut für Angewandte und Experimentelle Mechanik, Universität Stuttgart, 2006.
- [2] Gaul, L.; Maess, M.; Junge, M.; Herrmann, J.: Simulation der Wechselwirkung von Fluidschall und Körperschall in flexiblen Leitungssystemen. In: *Proceedings of 33. Deutsche Jahrestagung für Akustik DAGA*, Stuttgart, 2007.
- [3] Craig, R.R.; Bampton, M.C.C.: Coupling of structures for dynamic analysis, *AIAA Journal* **6**, 1313-1319, 1968.
- [4] Theissen, H.: Die Berücksichtigung instationärer Rohrströmung bei der Simulation hydraulischer Anlagen. Dissertation, RWTH Aachen, 1983.