

## DRUCKSCHWINGUNGSANALYSE HYDRAULISCHER LEITUNGSSYSTEME

Eine **Alternative** zu CFD

Bei Fluidtechnik denken viele sofort an CFD – doch auch die Druckschwingungsanalyse hat bei der Auslegung komplexer Hydrauliksysteme ihre Vorteile und ihre Daseinsberechtigung. **VON DR. HEIKO BAUM**



Komplexe hydraulische Systeme mit ihren vielen Schläuchen, Rohren und Komponenten sind in der schwingungstechnischen Simulation eine echte Herausforderung. Bilder: Fluidon

Druck- und Volumenstrompulsationen in fluidtechnischen Systemen sind eine häufige Ursache für Probleme und Beanstandungen – insbesondere, wenn es im Leitungssystem zum Resonanzfall kommt. Aus Pulsation resultiert Flüssigkeitsschall, der sich im Leitungssystem ausbreitet und als Wechselbelastung die Körperschallanregung der umgebenden Bauteile bewirkt. Im fluidtechnischen System kommt es hierdurch zu unerwünschten Geräuschemissionen durch Luftschall, die Bauteile erfahren ungünstige Dauerbelastungen und auch auf Funktion und Zuverlässigkeit können sich die Phänomene negativ auswirken (Bild 1).

Eine häufige Quelle von Flüssigkeitsschall sind Pumpen mit nichtkontinuierlichen Fördervorgängen, die zu einer zyklischen Volumenstromabgabe in das angeschlossene Leitungssystem führen. Wird die Pumpe zudem bei variablen Drehzahlen betrieben, wie dies etwa bei modernen frequenzgeregelten Pumpen-

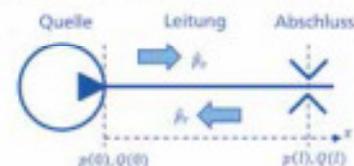
antrieben, bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Systemen im Automobil oder bei mobilen Arbeitsmaschinen der Fall ist, regt dies das Leitungssystem breitbandig an und es besteht die Gefahr von Resonanz und Druckschwingungsproblemen.

Soll solch ein Problem gelöst werden, sind die Kenntnis der Resonanzfrequenzen und die genaue Lokalisierung von Bereichen hoher und niedriger Druckpulsationen innerhalb des Leitungssystems die Grundvoraussetzungen für die erfolgreiche Auslegung. Beide Voraussetzungen lassen sich heutzutage durch Simulation ermitteln. Simulation ist anschließend auch das ideale Werkzeug für Dimensionierung und Positionierung der Abhilfemaßnahmen. Mittels geeigneter Simulationswerkzeuge wie DSHplus von Fluidon Aachen können problemspezifische Versuche durchgeführt werden, die so in der realen Welt ohne Gefährdung der Anlage nicht möglich wären. Es lassen sich gezielt kritische Betriebspunkte betrachten und systeminterne Grö-

ßen wie Drücke und Volumenströme, aber auch Kräfte und Geschwindigkeiten an beliebigen virtuellen Messstellen des Leitungssystems analysieren.

**Modell des Leitungssystems**

Allgemein wird das Schwingungsverhalten einer fluidtechnischen Leitung durch die Überlagerung von hinein- und reflektierter Druckwelle beschrieben. Für jede beliebige Stelle der Leitung ergibt sich der Wechseldruck  $p(t)$  in der Flüssigkeit. Der Proportionalitätsfaktor zwischen Wechseldruck und Volumenschwankung  $Q(t)$  ist die akustische Impedanz  $Z_a$  an dieser Stelle:

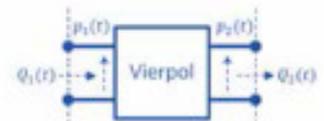


$$p(x, t) = p_1 \cdot \cos[\omega(t - \frac{x}{c})] + p_2 \cdot \cos[\omega(t + \frac{x}{c})]$$

$$Q(x, t) = -\frac{1}{Z_a} [p_1 \cdot \cos[\omega(t - \frac{x}{c})] + p_2 \cdot \cos[\omega(t + \frac{x}{c})]]$$

$$Z_a = p_1 \cdot \frac{c}{A \cdot v} = \frac{\rho}{Q}$$

ße ist die Schallgeschwindigkeit in der Flüssigkeit wesentlich größer als die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums, was in Hydrauliksystemen fast immer der Fall ist, dann gilt eine ebene Wellenausbreitung und das akustische Verhalten eines Leitungselements lässt sich als Vierpol-Übertragungsmatrix beschreiben:

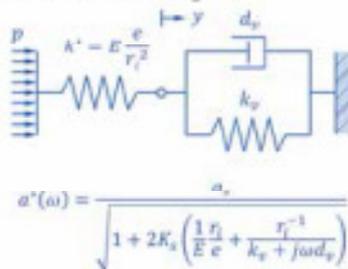


$$\begin{bmatrix} p_2(t) \\ Q_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(k_x \cdot l) & Z_a \cdot \sinh(k_x \cdot l) \\ \frac{1}{Z_a} \cdot \sinh(k_x \cdot l) & \cosh(k_x \cdot l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1(t) \\ Q_1(t) \end{bmatrix}$$

Abhängig von der Geometrie des Elements und den Stoffdaten der Flüssigkeit beschreibt die Vierpol-Übertragungsmatrix den dynamischen Zustand der Energiedurchgänge als Zeitfunktion des Drucks

$p(t)$  und des Volumenstroms  $Q(t)$ . Der Vorteil dieser Beschreibungsmethode ist die Möglichkeit der einfachen Verkettung von Leitungselementen zu Leitungssystemen. Um eine Schwingungssituation so realistisch wie möglich nachzubilden, wird das Leitungssystem aus verschiedenen Rohr- und Schlauchleitungselementen modelliert und um Ventile, Speicher, Widerstände, Querschnittsprünge, Verzweigungen und Rohrabschlussbauteile ergänzt. Mit dieser Vorgehensweise lassen sich auch komplizierte Leitungssysteme nachbilden, die die für die Hydraulik typischen nichtlinearen Bauteilverhaltensweisen modellieren und alles gemeinsam in einer zeitbereichsbasierten Simulation analysieren (Bild 2).

Wichtig für die Druckschwingungssimulation ist die genaue Berücksichtigung der druckabhängigen Rohraufweitung, da diese einen direkten Einfluss auf die Dämpfung der Druckpulsation und die Schallgeschwindigkeit hat. Bei Stahl- und Aluminiumrohren ist die Parametrierung der Rohrwandung kein Problem. Über Modellierungsansätze wie die allseits bekannte „Kesselformel“ wird die druckabhängige Aufweitung bei diesen Rohren hinreichend genau beschrieben. Bei „weichen“ Materialien wie Kunststoff- oder Gewebeschlauchleitungen hingegen, deren Materialeigenschaften sich druck-, temperatur- und sogar frequenzabhängig deutlich ändern, wird auf erweiterte Modellierungsansätze zurückgegriffen, die auch das visko-elastische Verhalten dieser Materialien berücksichtigen:



$k_v$  Steifigkeit des visko-elastischen Anteils  
 $d_v$  Dämpfungskonstante des visko-elastischen Anteils

Da die Druckschwingungssimulation häufig zur Lösung von akuten Problemfällen eingesetzt wird, bei denen es auf eine zeitnahe Hilfestellung ankommt, dürfen die Modellierungsansätze zur Abbildung einer visko-elastischen Rohrwandung jedoch keine komplizierten physikalischen Ansätze enthalten, die zeitaufwändige Berechnungen benötigen oder die aufwändig zu validieren sind. Zum Einsatz

kommen vielmehr empirische Modellierungsansätze, die mit aufbereiteten Messdaten parametrierbar sind.

Hierzu werden verschiedene Prüfstände genutzt, mit denen die Vierpol-Übertragungsmatrix und das Durchgangsdämmmaß beliebiger hydraulischer Bauteile kurzfristig messtechnisch ermittelt werden können, um die für die Simulation benötigten Materialparameter zu bestimmen.

Neben verschiedensten Leitungsmaterialien und -arten (gerade, gebogen, mit/ohne Verschraubung usw.) können auch Filter- und Dämpferbauteile sowie komplette Leitungssysteme gemessen werden. Diese Messungen werden auch zur akustischen Bewertung der Bauteile genutzt und unterstützen bei der Materialauswahl, der Bewertung der Serienstreuung (Finger-Print) oder dem Vergleich unterschiedlicher Lieferanten. Primär werden die Messungen aber als Referenz zum Abgleich der einzelnen Bauteile in der Simulation genutzt.

**Analyse der Druckpulsation**

Zur Analyse der Schwingungssituation wird die Druckpulsation entlang der Mittellinie des Leitungssystems visualisiert. Die typische Vorgehensweise bei dieser Art der Analyse wird anschließend anhand einer Beispielleitung vorgestellt. Die Leitung besteht aus drei Stahlleitungsegmenten und zwei Gewebeschlauchleitungen und hat eine Gesamtlänge von 8,1 Metern (Bild 3).

Kommt es in einem Leitungssystem zu Pulsationsproblemen, stehen gewöhnlich nur die Signale einzelner über die Anlage verteilter Drucksensoren für die Untersuchung der Schwingungssituation zur Verfügung. In der Beispielleitung ist dies durch Sensorbauteile gekennzeichnet. Mit den Drucksignalen lassen sich dann zwar die Frequenzen der Schwingung ermitteln, im Spektrum der Drucksignale sind das etwa die Hauptfrequenzen 65 Hz, 157 Hz und 330 Hz, es ist aber nur schwer möglich, hieraus Rückschlüsse auf die Schwin-

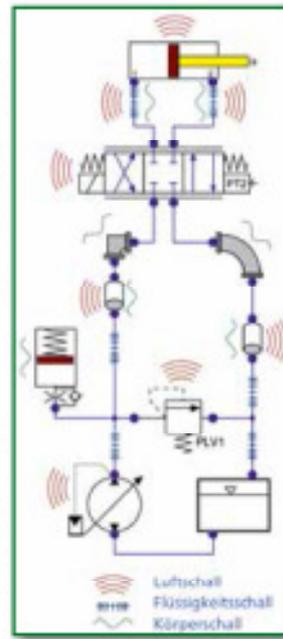


Bild 1: Schallarten in hydraulischen Systemen.

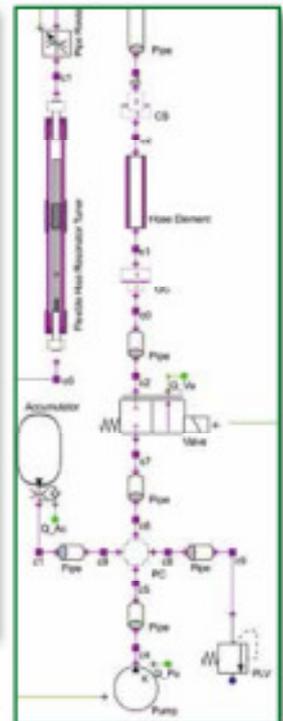


Bild 2: Komplexes hydraulisches Leitungssystem.

gungsform und die Wirkzusammenhänge in der Leitung zu ziehen (Bild 4).

Wird das Leitungssystem hingegen simulativ untersucht, stehen ergänzende Information für die Schwingungsanalyse zur Verfügung. Durch die Visualisierung der Druckschwingung im sogenannten „Druckvektorplot“ erhält man eine Übersicht über die räumliche Verteilung der Druckpulsation entlang der Mittellinie des Leitungssystems. Die Anregungsfrequenz bildet die X-Achse und die Leitungslänge die Y-Achse (Bild 5). Positionen hoher Pulsation (Druckbauch) und niedriger Pulsation (Druckknoten) können sehr einfach durch die farbliche Markierung abgelesen werden. Aus dem Druckvektorplot wird auch deutlich, dass die Resonanz bei 205 Hz durch die unglückliche Positionierung der Drucksensoren in Druckknoten dieser Schwingungsordnung fast gar nicht im Frequenzspektrum sichtbar ist und somit bei der Problemanalyse eventuell unberücksichtigt bleiben würde.

Die weitere Analyse der Schwingungssituation startet gewöhnlich mit der Su-

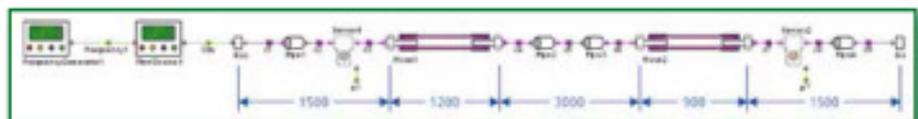


Bild 3: Beispielleitung aus Stahlrohren und Gewebeschläuchen.

Bild 4: Zeitsignale und Fourier-Spektren zweier in der Anlage verteilter Drucksensoren.

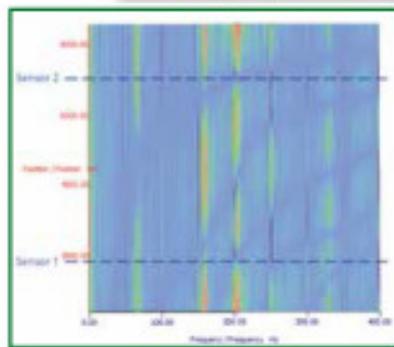
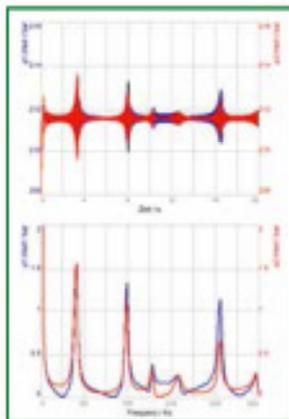


Bild 5: Druckbauchpositionen entlang der Leitungsmitte bei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen.

che nach  $\lambda/2$ - und  $\lambda/4$ -Resonanzen, um die Randbedingungen der Schwingungssituation eingrenzen zu können. Eine  $\lambda/2$ -Resonanz ergibt sich im Leitungssystem, wenn eine Leitung an beiden Enden einen geschlossenen Abschluss hat, wobei Hydrostaten generell und Ventile, je nach Betriebszustand, als geschlossener Abschluss zu betrachten sind (Bild 6). Beispiele hierfür sind etwa eine druckregelte

Pumpe, die in ein Konstantdrucksystem fördert, dessen Ventile geschlossen sind, oder ein hydrostatisches Getriebe. Eine  $\lambda/4$ -Resonanz stellt sich ein, wenn das Leitungssystem nur einseitig verschlossen ist und das andere Ende in einem großen Volumen endet. Dies kann eine Leitung sein, die in einen Tank oder in einen großen Zylinder mündet oder ein Hydraulikspeicher, der über eine Stichleitung mit dem Leitungssystem verbunden ist.

Nach dieser Theorie sollte die  $\lambda/2$ -Resonanz für das 8,1 Meter lange Beispielleitungssystem bei einer Schallgeschwindigkeit von 1.320 m/s bei etwa 80 Hz liegen. Sichtbar ist eine  $\lambda/2$ -Resonanz aber bereits bei 65 Hz (Bild 7). Theoretisch sollten die höheren Ordnungen dieser Schwingung jetzt bei jeweils ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz erkennbar sein, also bei 130 Hz und 195 Hz. Im Druck-Vektor-Plot ist jedoch zu erkennen, dass die zweite und dritte Schwingungsordnung bei 157 Hz beziehungsweise 205 Hz liegen. Die Ursache dieser Verzerrung in der Abfolge der Resonanzfrequenzen ist die Unterteilung der Leitung in Stahlrohr- und Schlauchsegmente. Selbst bei gleichen Durchmessern der Segmente bewirkt der Materialwechsel eine Änderung der Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit im jeweiligen Segment. Verzerrungseffekte der Systemresonanzen ergeben sich außerdem, wenn das Leitungssystem aus Segmenten unterschiedlichen Durchmessers oder aus parallelen Leitungssträngen aufgebaut ist.

Ändern sich zusätzlich auch noch die Temperaturen, bei denen das hydraulische System betrieben wird, hat dies wiederum Einfluss auf die Fluid- und die Materialdaten der Leitungswandungen. Es kommt zu einer Veränderung der Resonanzen und zu einem Rückgang der Systemeigen-dämpfung. Eine umfassende Analyse der Schwingungssituation ist dann nur noch mittels der gezeigten simulativen Vorgehensweise möglich.

#### Nächste Analyseschritte

Nachdem ein Überblick der Schwingungssituation im Leitungssystem gewonnen wurde, wird mit der Betrachtung der Leitungsabschlüsse fortgefahren. Schwingungstechnisch wurden Pumpen, Motoren, Zylinder oder Ventile bereits als geschlossene oder offene Leitungsabschlüsse eingestuft. Die Geometrie dieser Bauteile muss aber noch berücksichtigt werden. Die internen Kanäle, Widerstände und Volumina von

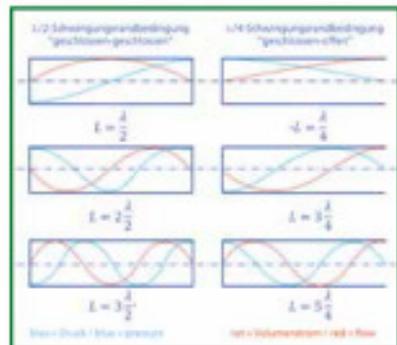


Bild 6: Charakteristische Schwingungssituationen in Leitungssystemen.

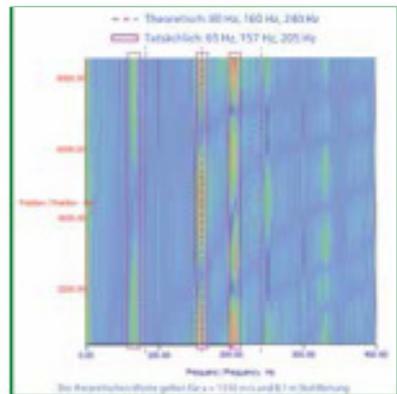


Bild 7:  $\lambda/2$ -Resonanzen im Beispielleitungssystem. Bilden: Fluidon

Pumpen, Motoren oder Zylindern haben einen deutlichen Einfluss auf das dynamische Verhalten des jeweiligen Leitungsabschlusses. Da sich das dynamische Verhalten zu allem Überfluss auch noch abhängig von der Schwingungsfrequenz ändern kann, spricht man in diesem Zusammenhang auch von der Abschlussimpedanz. Die Berücksichtigung der Abschlussimpedanzen in der Simulation ist essenziell für eine realistische Druckschwingungsanalyse hydraulischer Leitungssysteme. Nur so kann der Entwurf passender Abhilfemaßnahmen erfolgreich sein.

#### Schneller als CFD-Analyse

Die Druckschwingungsanalyse mittels DSHplus liefert Ergebnisse, die mit einer CFD-Simulation vergleichbar sind, dabei jedoch nur einen Bruchteil von deren Rechenzeit benötigt. Wenn es darum geht, eine Effektanalyse durchzuführen oder Abhilfemaßnahmen mittels Parametervariation vorzubereiten oder zu optimieren, ist dies also eine geeignete Methode. JB |

Dr. Heiko Baum ist Geschäftsführer bei Fluidon.

## EINSATZFÄLLE FÜR DIE DRUCKSCHWINGUNGSANALYSE

Typische Einsatzbereiche für die simulative Druckschwingungsanalyse mit DSHplus sind stationärhydraulische Maschinen und Anlagen, die Mobilhydraulik in Bau-, Kommunal- und Landmaschinen sowie Luftfahrt-, Schienen- und Meerestechnikanlagen, die folgende Merkmale aufweisen:

- die Leitungssysteme bestehen aus Segmenten unterschiedlicher Länge und Durchmesser sowie verschiedenen Rohr- und Schlauchleitungsmaterialien
- die Leitungssysteme werden stark unterschiedlichen Umgebungstemperaturen ausgesetzt
- die Anlagen haben eine zyklische oder intermittierende Arbeitsweise mit höheren Taktfrequenzen
- die Energieversorgungen der Anlage sind mit drehzahlgeregelten Pumpenantrieben ausgerüstet.