

Druckschwingungsanalyse hydrostatischer Antriebsstränge

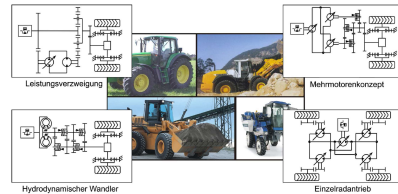
Druckschwingungen in hydrostatischen Antriebssträngen können Geräusche und Bauteilschädigungen verursachen und beeinträchtigen die Funktion und die Zuverlässigkeit. Eine Analyse der Druckschwingungssituation kann nur im Gesamtsystem erfolgen, da Leitungsverzweigungen und die Hydrostaten selbst Einfluss auf die Resonanzfrequenzen und die Schwingungsformen haben.

Ausgangssituation:

Ein moderner Antriebsstrang wird immer komplexer und besitzt in der Regel mindestens eine Fahrpumpe und mehrere Fahrmotoren.

Verbunden sind die Hydrostaten des Getriebes durch ein Leitungssystem, das sich abhängig von der Topologie des gesamten Fahrzeugs in mehrere Leitungen unterschiedlicher Länge verzweigt.

Die Hydrostaten werden individuell verstellt, um den Antriebsstrang im optimalen Wirkungsgradbereich zu betreiben oder um spezielle Betriebsbedingungen zu



Schemata und Anwendungsbeispiele unterschiedlicher Antriebsstränge
(Bildquelle: Dissertation Tonien Kohnhaaser 2008: Modellbildung, Analyse und Auslegung hydrostatischer Antriebsenergieerzeuger)

Klassische Herangehensweise:

Sowohl bei der Messung am realen Antriebsstrang als auch bei einer simulativen Analyse stehen gewöhnlich nur Drucksignale an diskreten Messstellen zur Verfügung.

Bei der Analyse der Drucksignale wird verständlich, dass alleine auf Basis der diskreten Messstellen ein vertieftes Verständnis der Schwingungssituation nur schwer zu erreichen ist, da Drucksensoren immer nur die Summe der Pulsation an der Messstelle erfassen.

Aus den Drucksignalen kann mittels FFT zwar bereits auf die kritischen Resonanzfrequenzen des Systems geschlossen werden, hierbei bleibt jedoch unklar, durch welche Pumpenordnung diese Resonanzen angeregt werden und welche Teile des Leitungssystems in die Schwingung involviert sind. Ein erster Erkenntnisgewinn wird erzielt, wenn aus den Drucksignalen Spektrogramme berechnet werden. In einem Spektrogramm kann zwischen konstanten Frequenzen (Systemresonanzen), die als horizontale Linien sichtbar sind, und zwischen drehzahlvarianten Frequenzen, die bei einer linearen Drehzahländerung auffächern, unterschieden werden.

Die Spektrogramme verdeutlichen, dass die Hydrostaten ein breitbandiges Anregungsspektrum erzeugen. Wann immer eine dieser vielen Anregungsfrequenzen eine Systemresonanz „trifft“, ist dies im Spektrogramm an einem deutlichen Anstieg der Druckpulsationsamplitude zu erkennen. Welche Schwingungsform jetzt von einer bestimmten Systemresonanz erzeugt wird, ist aus den Spektrogrammen jedoch nur schwer ablesbar. Die Kenntnis über den Verlauf der Schwingungsform im Leitungssystem ist aber essentiell für den Erfolg einer Abhilfemaßnahme. Sonst wird unter Umständen ein Dämpfer/Resonator an der Position eines Druckknotens oder im falschen Leitungsweig positioniert.

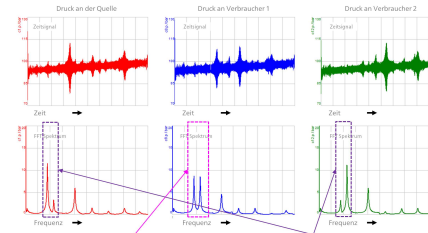
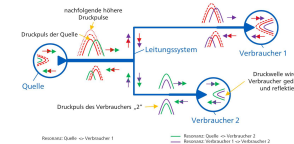
Der Dämpfer ist dann in Bezug auf die anvisierte Resonanzfrequenz nutzlos. Im schlimmsten Fall wirkt sich der falsch positionierte Dämpfer sogar negativ auf andere Resonanzen aus.

Druckschwingungssituation im hydrostatischen Antriebsstrang:

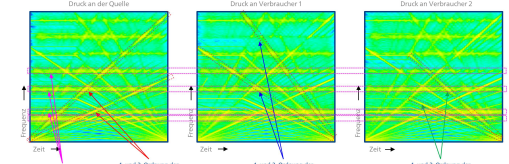
Grundsätzlich gilt, dass jedes Hydrauliksystem, auch ein hydrostatischer Antriebsstrang, mehrere Eigenfrequenzen besitzt. Dies bedeutet aber noch nicht, dass im System auch Resonanzprobleme auftreten. Dazu müssen die Eigenfrequenzen zunächst einmal angeregt werden. Im Antriebsstrang erfolgt diese Anregung durch die Hydrostaten. Ob es im Resonanzfall zu einem Druckschwingungsproblem kommt, hängt von der Systemdämpfung und von der Höhe der Druckpulsation ab. Im Idealfall wird eine von der Quelle ins System eingebrachte Druckwelle auf ihrem Weg durch das System und zurück zur Quelle komplett dissipiert. Selbst wenn die Resonanz "getroffen" wird, kommt es dann zu keinem Druckschwingungsproblem.

Bei hydrostatischen Antriebssträngen größerer Leistung ist in der Regel die Druckpulsation so groß, dass die Druckwelle nicht komplett dissipiert wird. Im Resonanzfall trifft die rücklaufende Druckwelle genau dann (und mit der richtigen Phase) auf die Quelle, wenn eine neue Druckwelle erzeugt wird.

Die idealisierte Betrachtung eines Druckpulses der Quelle (Pumpe) ist natürlich gleichermaßen auch für einen Druckpuls des Verbrauchers (Motor) gültig. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Systemresonanz getroffen wird, erhöht sich somit mit jedem Hydrostaten, der seine Drehzahl individuell ändert und macht die druckschwingungsfreie Auslegung des Leitungssystems zu einer Herausforderung.



Zeitsignale und FFT-Spektren der Drucke direkt am Hydrostatenflansch



Spektrogramme der Drucksignale am Hydrostatenflansch bei simultaner Verstellung der Hydrostaten

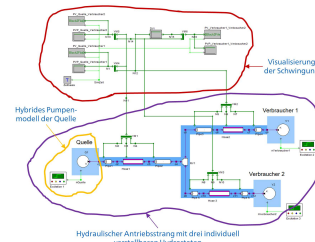
Die simulative Druckschwingungsanalyse identifiziert kritische Frequenzen und lokalisiert die Bereiche hoher und niedriger Druckpulsationen. Die Visualisierung der Schwingungsform hilft, die Wirkzusammenhänge im hydrostatischen Antriebsstrang zu verdeutlichen und ist eine Grundvoraussetzung für die Entwicklung von Abhilfemaßnahmen.

Lösungsansatz mittels simulativer Druckschwingungsanalyse:

In der Entwicklung eines Antriebsstrangs ist es nahezu unmöglich, alle kritischen Betriebszustände versuchs-technisch abzusichern. Messtechnisch ist die Schwingungsform, die zu einer Systemresonanz gehört, außerdem nur mit einer großen Anzahl über das Leitungssystem verteilter Sensoren möglich. Gerade bei höheren Ordnungen der Systemresonanz bedarf es zahlreicher Messpunkte, um aus der Messung die Hüllkurve der Schwingungsform zu rekonstruieren.

Hier kommt jetzt die simulative Druckschwingungsanalyse als Hilfsmittel zur entwicklungsbegleitenden Absicherung ins Spiel. Mit modernen fluidtechnischen 1D-Simulationswerkzeugen ist eine Vorhersage möglich, bei welchen Betriebsbedingungen (stationärer Druck, dynamische Druckamplitude, Frequenz der Pulsation) der Antriebsstrang druckschwingungsmäßig auffällig ist.

Das Simulationsmodell berechnet in kurzen Abständen entlang der Mittelachse eines Rohrleitungsstranges die Druckamplituden. Die Druckamplituden werden in eine Datei geschrieben, wodurch eine Datenmatrix für die spätere Visualisierung und Analyse der



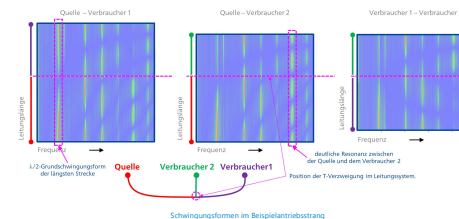
Simulationmodell des hydrostatischen Beispielantriebsstrangs, der aus drei Hydrostaten und einem verzweigten Leitungssystem, das aus mehreren Röhren und Schläuchenelementen modelliert ist, besteht

Interpretation der Schwingungssituation:

Für jeden Leitungsstrang wird ein sogenannter Druckvektorplot erstellt. Auf der x-Achse eines Diagramms ist die Frequenz der Schwingung aufgetragen. Die y-Achse eines Diagramms repräsentiert die Leitungslänge. Jede der sichtbaren vertikalen Linien ist eine Resonanzfrequenz des Antriebsstranges.

Farbig markiert ist die erste Eigenfrequenz des längsten Leitungsstrangs ($\lambda/2$ -Grundfrequenz). Gut zu erkennen ist die Symmetrie der Schwingung mit dem Druckknoten in der Mitte der Schwingungsform. Die Prinzipskizze des Antriebsstrangs verdeutlicht, dass die T-Verzweigung mit der Zuleitung zum Verbraucher 2 etwa außerhalb der Mitte der Verbindungsleitung von Quelle zu Verbraucher 1 liegt. Dies hat zur Folge, dass die T-Verzweigung in einem Druckbauch der zweiten Schwingungsordnung liegt. Die Pulsation der zweiten Ordnung der Grundschwingung wirkt somit als Anregung für die Leitung von der T-Verzweigung zum Verbraucher 2. Der abweigende Leitungsstrang wird hierdurch mindestens zwangsangeregt und kann im ungünstigsten Fall sogar seinerseits in Resonanz geraten.

Den genau entgegengesetzten Fall zeigte die zweite markierte Schwingung. Die T-Verzweigung liegt jetzt genau in einem Druckknoten, wodurch es in der Zuleitung zu Verbraucher 1 zu keiner Pulsationsanregung kommt, obwohl im Leitungsstrang von Quelle zum Verbraucher 2 deutlich die Pulsationen der vierten Schwingungsordnung zu erkennen sind.



Schwingungsformen im Beispielantriebsstrang

