

Druckschwingungsanalyse von Leitungssystemen mit visko- elastischem Materialverhalten der Rohrwand

Modellsynthese und messtechnische
Ermittlung der Modellparameter

Heiko Baum , Enrico Pasquini
FLUIDON Gesellschaft für Fluidtechnik mbH,
Jülicher Straße 338a, 52070 Aachen
E-Mail: heiko.baum@fluidon.com



22 – 23.11.2016 – Baden-Baden

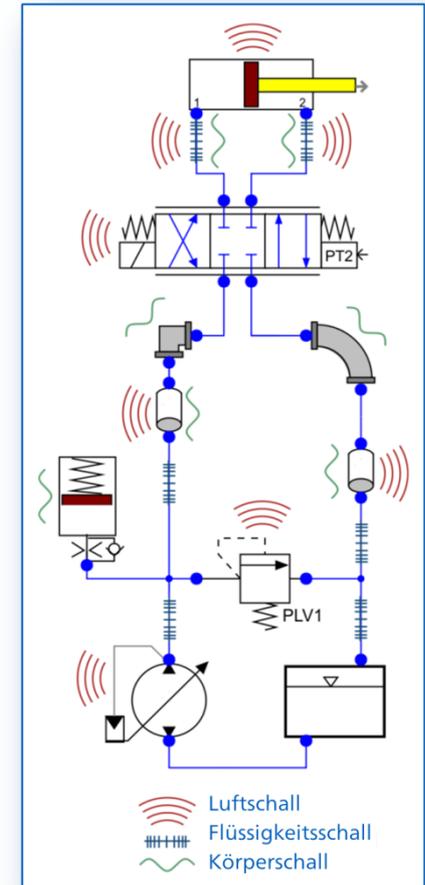
Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Synthese des viskoelastischen Schlauchwandmodells
- 3 Messung der Vierpol-Übertragungsfunktion
- 4 Identifikation der viskoelastischen Materialparameter
- 5 Druckschwingungsanalyse hydraulischer Leitungssysteme
- 6 Zusammenfassung

Einleitung

Warum, wieso, weshalb?

- In fluidtechnischen Systemen sind Druck- und Volumenstrompulsationen eine häufige Ursache für Probleme, besonders wenn es im Leitungssystem zum Resonanzfall kommt.
- Wichtig für die simulative Analyse der Druckschwingungen ist die Berücksichtigung der druckabhängigen Rohraufweitung.
- Bei bestimmten Materialien wie z. B. Kunststoff- oder Gewebeschlauchleitungen muss hierfür auf erweiterte Modellierungsansätze zurückgegriffen werden, die auch das viskoelastische Verhalten der Werkstoffe berücksichtigen.
- Da die Druckschwingungssimulation häufig zur zeitkritischen Problemlösung eingesetzt wird, dürfen die Modellierungsansätze keine komplizierten physikalischen Ansätze enthalten, die aufwändige Berechnungen und Validierungen benötigen.
- In diesem Beitrag wird daher ein alternativer Ansatz vorgestellt, bei dem ein empirischer Modellierungsansatz zum Einsatz kommt, dessen Parameter mittels numerischer Optimierung aus Messdaten ermittelt werden.



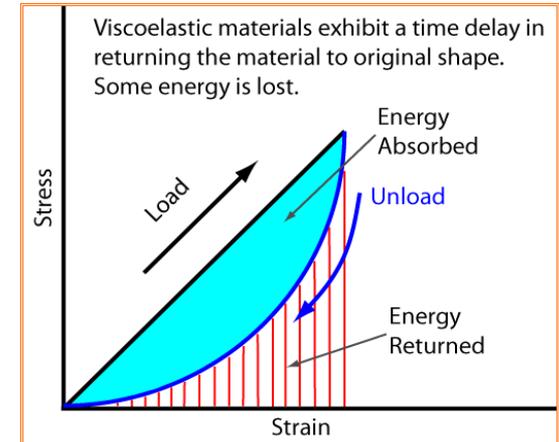
Inhalt

- 1** Einleitung
- 2** Synthese des viskoelastischen Schlauchwandmodells
- 3 Messung der Vierpol-Übertragungsfunktion
- 4 Identifikation der viskoelastischen Materialparameter
- 5 Druckschwingungsanalyse hydraulischer Leitungssysteme
- 6 Zusammenfassung

Synthese des viskoelastischen Schlauchwandmodells

Thematische Einordnung

- Als Viskoelastizität bezeichnet man ein teilweise elastisches, teilweise viskoses Materialverhalten. Viskoelastische Stoffe vereinigen also Merkmale von Flüssigkeiten und Festkörpern in sich.
- Der Effekt ist zeit-, temperatur- und frequenzabhängig und tritt bei polymeren Schmelzen und Festkörpern wie z. B. Kunststoffen aber auch anderen Materialien auf.
- Der elastische Anteil bewirkt grundsätzlich eine spontane, begrenzte, reversible Verformung, während der viskose Anteil grundsätzlich eine zeitabhängige, unbegrenzte, irreversible Verformung bewirkt.
- Der viskose und elastische Anteil ist bei verschiedenen viskoelastischen Materialien jeweils unterschiedlich stark ausgeprägt, auch die Art des Zusammenwirkens differiert.¹
- Im Gegensatz zu elastischen Materialien absorbiert ein viskoelastisches Material während Deformation etwas Energie, die in Wärme umgewandelt wird.
- Da diese Energie, salopp gesagt, aus der Druckpulsation entnommen wird, ergibt sich ein dämpfender Einfluss auf die Druckschwingungssituation.

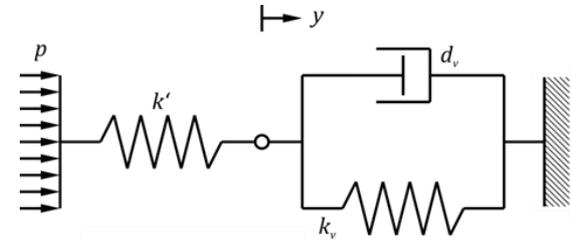


Quelle [1]: de.wikipedia.org/wiki/Viskoelastizit%C3%A4t

Synthese des viskoelastischen Schlauchwandmodells

Ersatzschaltbild der Schlauchwand

- Soll bei einer Simulationsrechnung das viskoelastische Verhalten der Rohrwand berücksichtigt werden, kann zur Beschreibung des Materialverhaltens ein Zener-Körper, d. h. eine Reihenschaltung einer linearen Feder und eines Kelvin-Voigt-Körpers, verwendet werden.
- Die Feder mit der Steifigkeit k' berücksichtigt die rein elastische radiale Aufweitung der Rohrwand, wie sie auch bei einem linear-elastischen Rohr auftreten würde.
- Durch den Kelvin-Voigt-Körper wird der viskoelastische Anteil y der radialen Wandaufweitung abgebildet. Die Parameter k_v und d_v bezeichnen die Steifigkeits- und Dämpfungskonstanten des Kelvin-Voigt-Körpers.
- Für die Simulation müssen die drei Parameter des Zener-Körpers aus Messdaten ermittelt werden.



Ersatzschaltbild des Zener-Körpers
beim DSHplus-Wandmodell

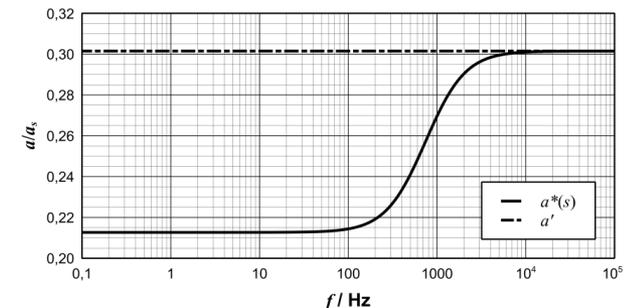
Synthese des viskoelastischen Schlauchwandmodells

Frequenzabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit

- Bei harmonischer Erregung gilt für die Laplace-Variable $s=j\omega$, sodass die komplexe effektive Schallgeschwindigkeit a^* offensichtlich eine frequenzabhängige Größe darstellt.
- Die gestrichelt gezeichnete Linie zeigt die – frequenzinvariante – effektive elastische Schallgeschwindigkeit a' , die sich einstellen würde, wenn das Materialverhalten der Rohrwand nur durch die linear-elastische Einzelfeder k' bestimmt würde.
- Für den Grenzfall einer verschwindenden Frequenz (quasistatische Belastung) strebt der Beitrag des Dämpferelements zur komplexen Steifigkeit des Kelvin-Voigt-Körpers gegen Null. Damit degeneriert der Zener-Körper zu einer Reihenschaltung der Federn k_v und k' . Für den umgekehrten Grenzfall einer unendlichen Frequenz strebt die komplexe Steifigkeit des Kelvin-Voigt-Körpers ebenfalls gegen unendlich, d. h. gegen ein Starrkörperverhalten. In diesem Fall verbleibt nur die Steifigkeit der Einzelfeder k' .

$$a^*(s) = \frac{a_s}{\sqrt{1 + K_s \left(\frac{2 r_i}{E' e} + \frac{2 r_i^{-1}}{k_v + s d_v} \right)}}$$

Frequenzabhängige
Schallgeschwindigkeit



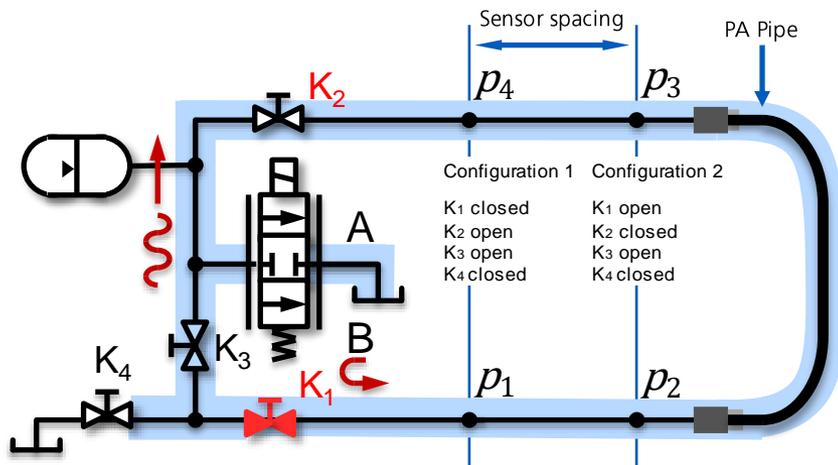
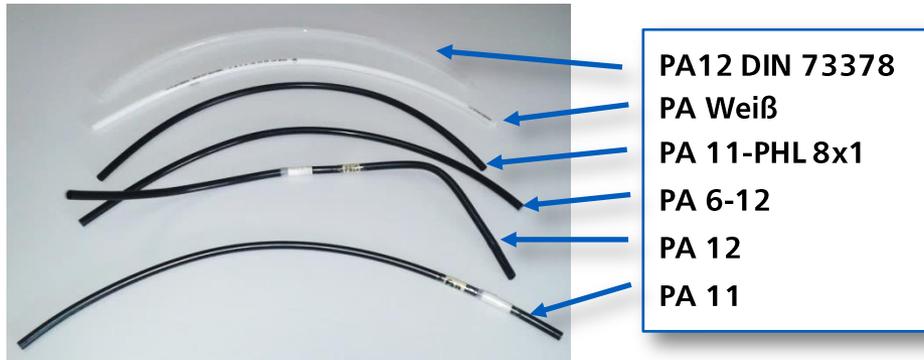
Beispielhafter Frequenzgang der effektiven Schallgeschwindigkeit in einer viskoelastischen Leitung

Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Synthese des viskoelastischen Schlauchwandmodells
- 3 Messung der Vierpol-Übertragungsfunktion
- 4 Identifikation der viskoelastischen Materialparameter
- 5 Druckschwingungsanalyse hydraulischer Leitungssysteme
- 6 Zusammenfassung

Messung der Vierpol-Übertragungsfunktion

Untersuchte PA-Leitungen und Messprinzip



- Im Rahmen von Diplom- und Masterarbeiten wurde das akustische Verhalten unterschiedlicher PA-Leitungen gestreckt und gebogen gemessen.
- Für die Messungen kam ein Prüfstand zum Einsatz, mit dessen Messdaten die Vierpol-Übertragungsmatrix und das Durchgangsdämmmaß beliebiger hydraulischer Bauteile berechnet werden kann.
- Eine umfassende Beschreibung des aus der Akustik stammenden Messverfahrens und der möglichen Messaufbauten, inklusive einer Diskussion deren spezifischer Vor- und Nachteile, findet sich bei TAO [3].

Quelle [3]: Tao, Z.; Seybert, A. F.: A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss, 03NVC-38, SAE Technical Paper 2003-01-1653, 2003

Messung der Vierpol-Übertragungsfunktion

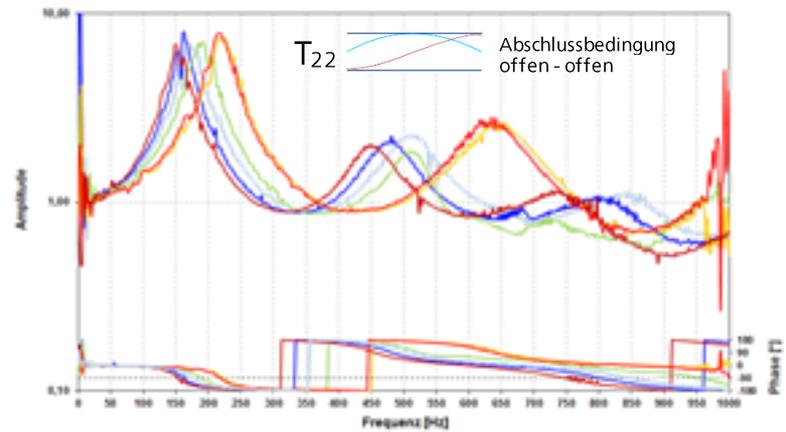
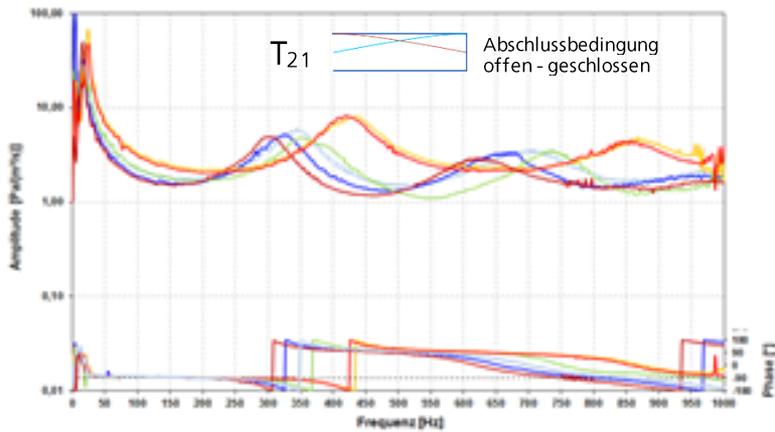
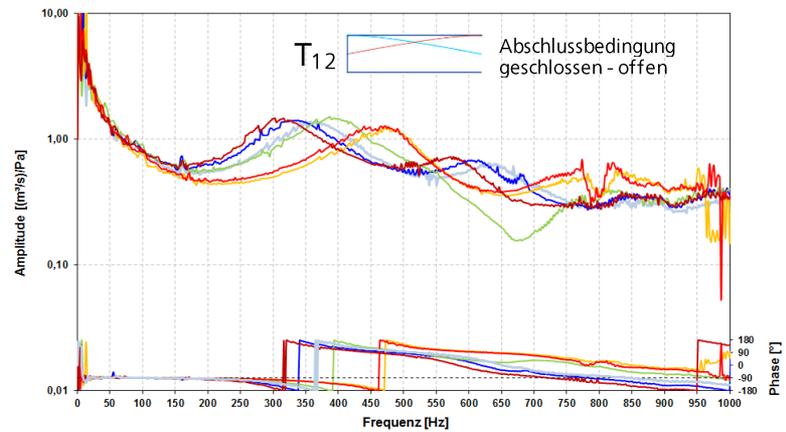
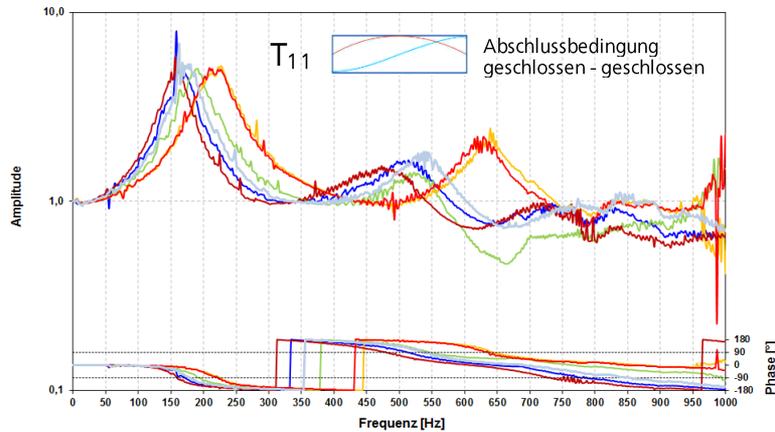
Transportabler Vierpol-Prüfstand

- Sensorik und Aktorik des Vierpol-Prüfstand sind an einem Aluminiumträgerrahmen befestigt und können so flexibel an unterschiedliche Prüflinge angepasst werden.
- Bei kleineren Prüflingen passt der Aufbau in eine Industriekühltruhe, wodurch sehr einfach Messungen in einem Temperaturbereich von -20 °C bis $+40\text{ °C}$ möglich sind.
- Für größere Prüflinge kommt der Aufbau in eine Klimakammer.
- In der gezeigten Ausführung ist der Prüfstand für statische Drücke bis 10 bar einsetzbar.



Messung der Vierpol-Übertragungsfunktion

Vierpol-Matrix der untersuchten PA-Leitungen bei 23°C



- Die Vierpol-Übertragungsfunktionen zeigen das Resonanzverhalten des Prüflings in Abhängigkeit der vier idealen Schwingungsrandbedingungen.

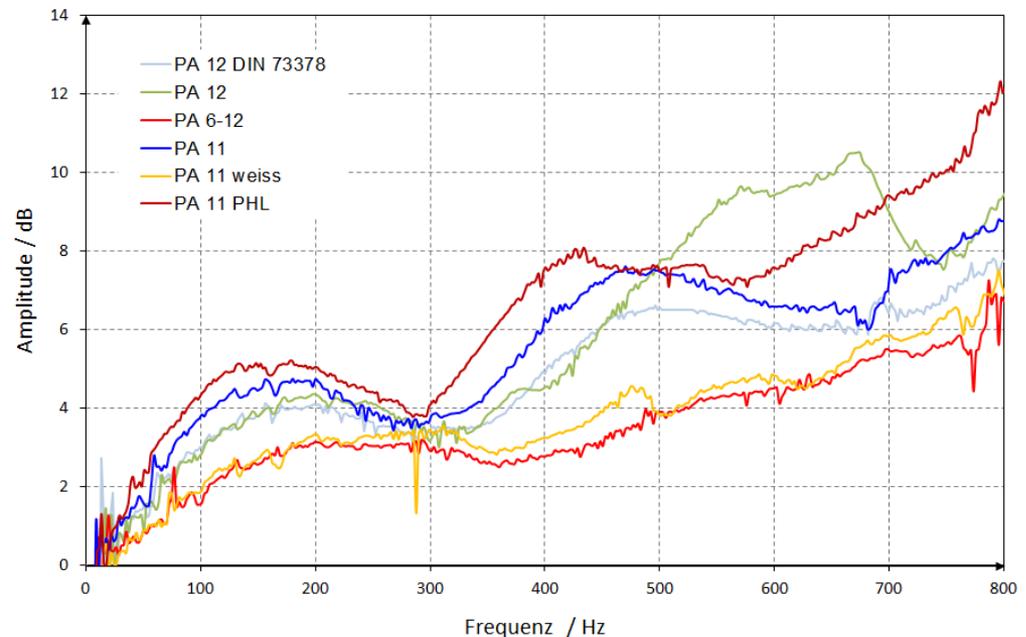
Messung der Vierpol-Übertragungsfunktion

Durchgangsdämmmaß der untersuchten PA-Leitungen bei 23°C

- Das Durchgangsdämmmaß (engl. Transmission Loss) wird aus der Vierpol-Matrix berechnet und beschreibt die Verhältnis von aufgeprägter zu durchgelassener Schalleistung.
- Das Durchgangsdämmmaß charakterisiert das akustische Verhalten eines Bauteils unabhängig von der Einbausituation.
- Das Durchgangsdämmmaß ist somit auch gut geeignet, das akustische Verhalten unterschiedlicher Bauteile zu vergleichen (Fingerprint).
- Für die untersuchten Leitungen wird deutlich, wie sehr das akustische Verhalten von der Polyamidmischung abhängt.

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4} \left| T_{11} + T_{12} \frac{S}{\rho c} + T_{21} \frac{\rho c}{S} + T_{22} \right|^2 \right)$$

S ist der Einlass- und Auslassquerschnitt;
 ρ c sind die Dichte und die Schallgeschwindigkeit

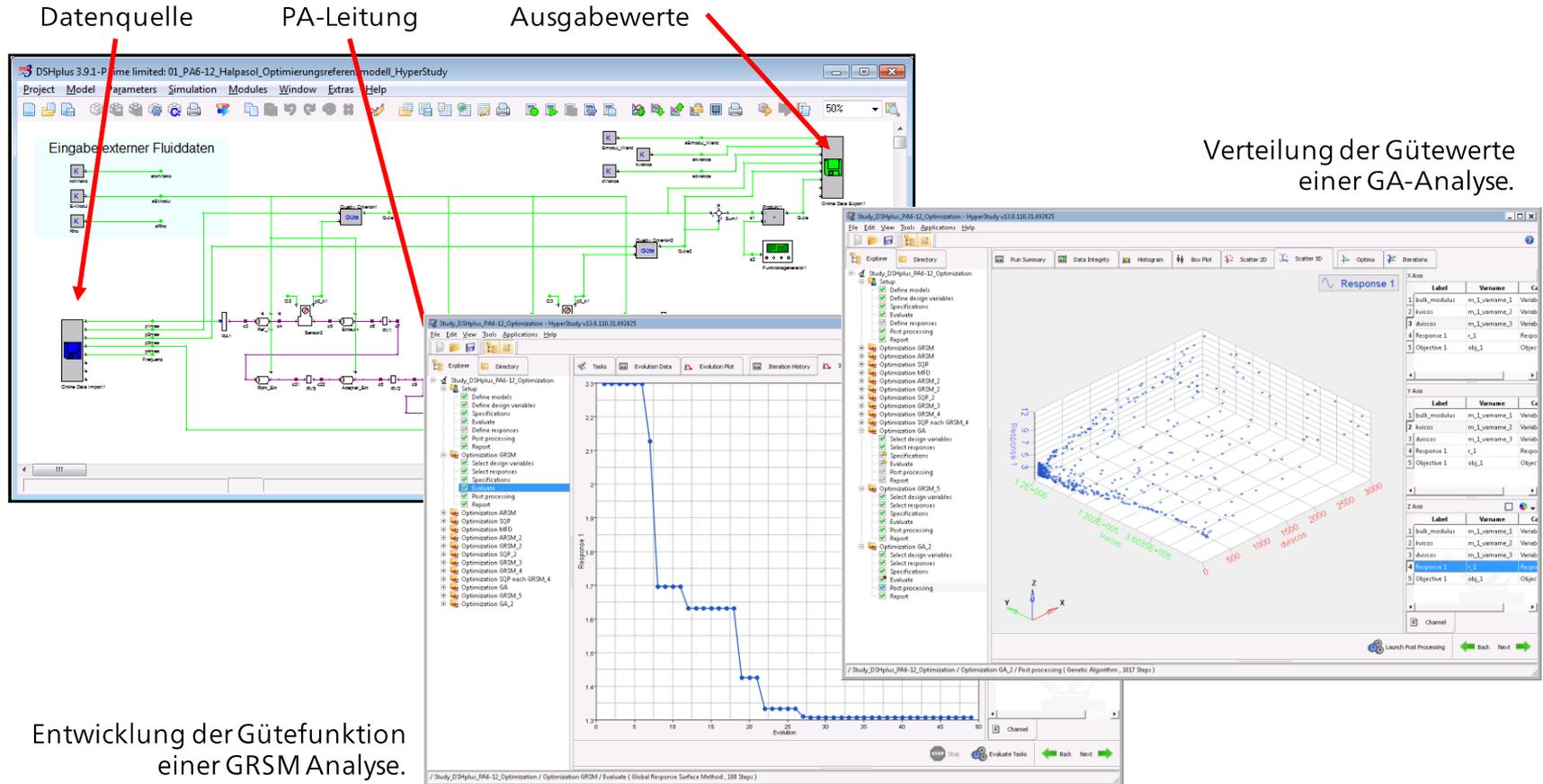


Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Synthese des viskoelastischen Schlauchwandmodells
- 3 Messung der Vierpol-Übertragungsfunktion
- 4 Identifikation der viskoelastischen Materialparameter
- 5 Druckschwingungsanalyse hydraulischer Leitungssysteme
- 6 Zusammenfassung

Identifikation der viskoelastischen Materialparameter

Vorgehensweise bei der Parameteroptimierung

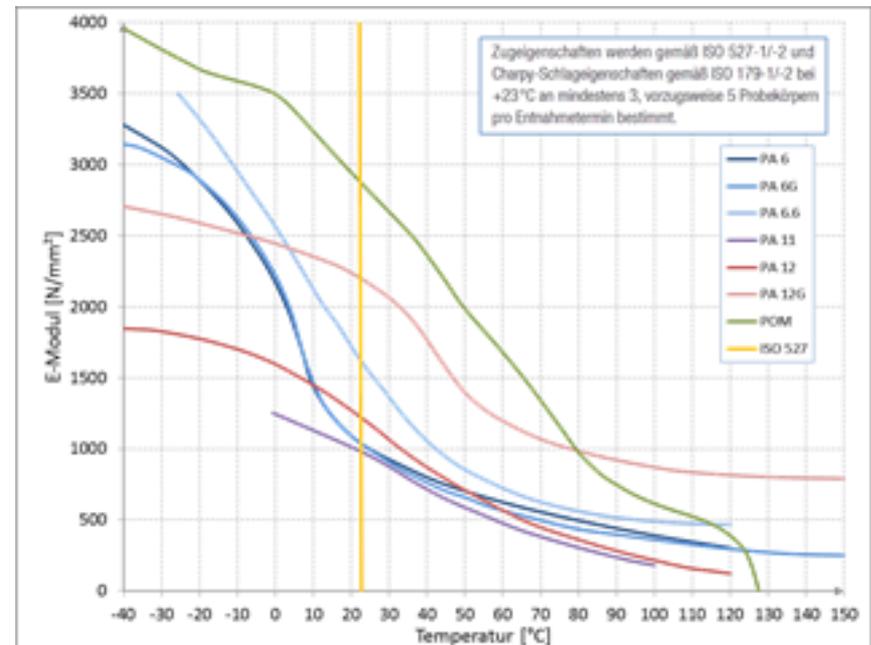


- Die Identifikation der viskoelastischen Materialparameter erfolgt automatisch mittels numerischer Optimierung.

Identifikation der viskoelastischen Materialparameter

Parameterverknüpfung während der Optimierung

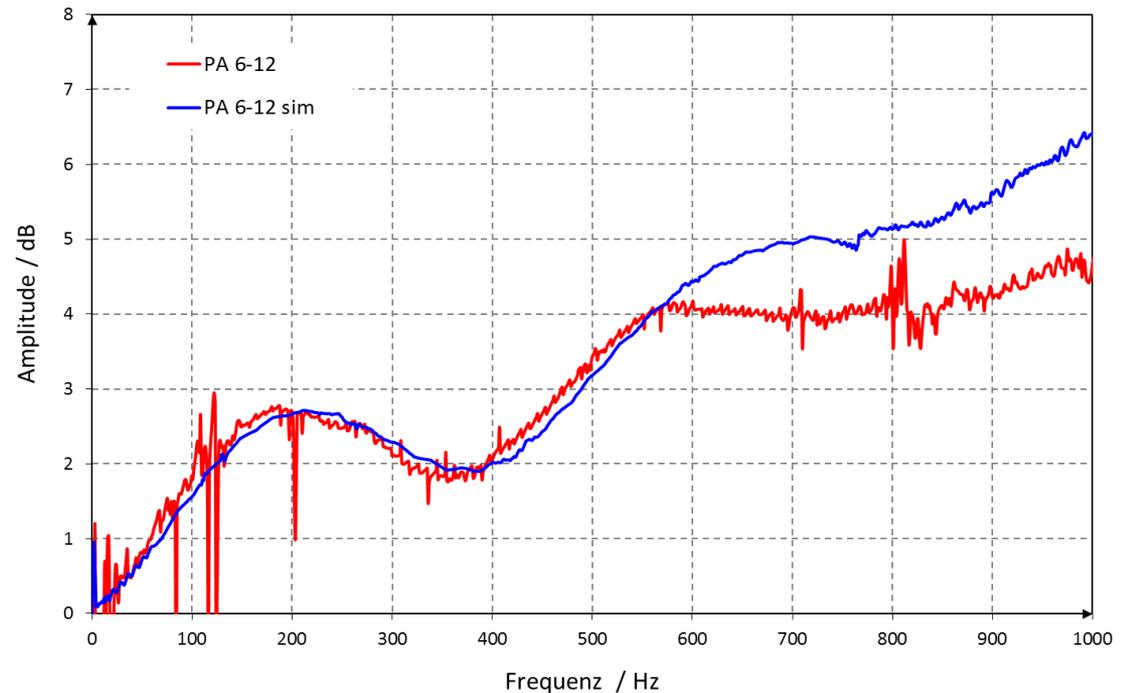
- Der Optimierer variiert in jedem Simulationslauf die Werte für k_v und d_v und bewertet die Veränderung des Gütewerts.
- Zur vollständigen Parametrierung des Zener-Körpers wird jedoch noch der Wert für den Ersatzelastizitätsmodul der Rohrwandung E' als dritter Wert benötigt.
- E' wird aus dem aktuell gewählten Wert für k_v und dem Elastizitätsmodul E des PA-Werkstoffs für jeden Simulationslauf neu berechnet.
- Der Basiswert für den Elastizitätsmodul E ist temperaturabhängig und wird aus den Materialdaten entnommen.
- Die nebenstehende Grafik zeigt für unterschiedliche PA-Materialien eine Übersicht der temperaturabhängigen Elastizitätsmodule E .



Identifikation der viskoelastischen Materialparameter

Parameterverknüpfung während der Optimierung

- Die Grafik zeigt den Vergleich von gemessenem und simuliertem Durchgangsdämmmaß einer 500 mm langen Leitung aus PA 6-12.
- Der qualitative Verlauf der beiden Kurven stimmt recht gut überein, auch wenn das simulierte Ergebnis ab ca. 600 Hz eine höhere Dämpfung zeigt als die Messung.
- Im Frequenzbereich unterhalb von 500 Hz, der z. B. für die simulative Analyse von Kraftstoff-Niederdrucksystemen von Bedeutung ist, zeigen die beiden Kurven bereits eine sehr gute Übereinstimmung, so dass die gefundenen viskoelastischen Materialparameter hier sofort in der Projektarbeit genutzt werden können.



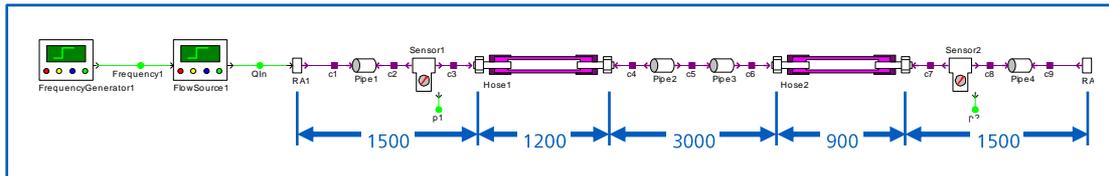
Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Synthese des viskoelastischen Schlauchwandmodells
- 3 Messung der Vierpol-Übertragungsfunktion
- 4 Identifikation der viskoelastischen Materialparameter
- 5 Druckschwingungsanalyse hydraulischer Leitungssysteme
- 6 Zusammenfassung

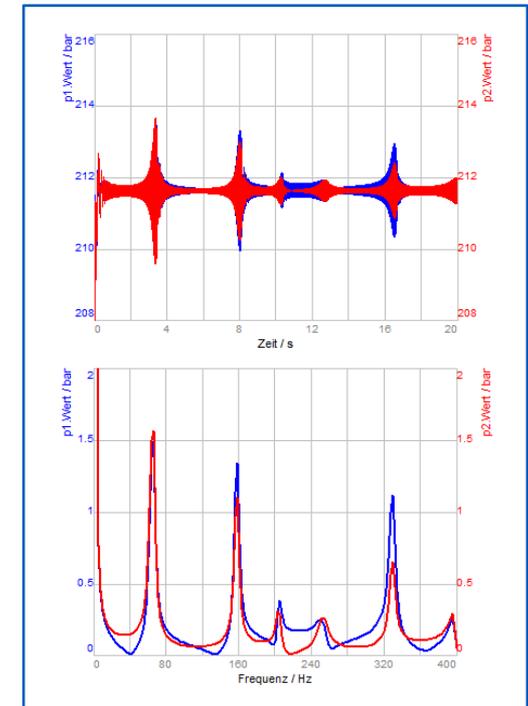
Druckschwingungsanalyse hydraulischer Leitungssysteme

Klassische Vorgehensweise

- 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 8,1 m Beispielleitung, bestehend aus drei Stahl- und zwei viskoelastischen Leitungstücken, ist dies durch Sensoren gekennzeichnet.
- Mit den erfassten Drucksignalen lassen sich zwar die Frequenzen der Schwingung ermitteln, im dargestellten Spektrum der Drucksignale sind das z. B. die Hauptfrequenzen 65 Hz, 157 Hz und 330 Hz, es ist aber nur schwer möglich, hieraus Rückschlüsse auf die Schwingungsform und die Wirkzusammenhänge in der Leitung zu ziehen.

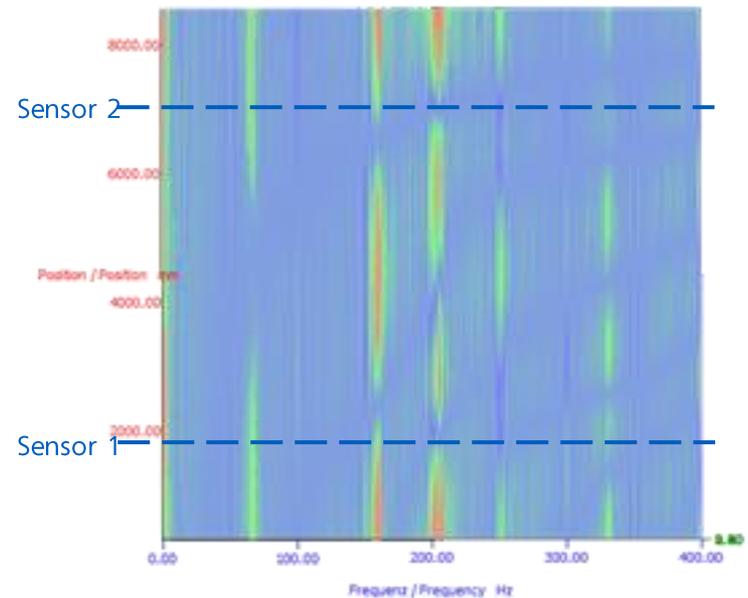


Druckschwingungsanalyse hydraulischer Leitungssysteme

Simulative Analyse der Schwingungssituation

- Wird das Leitungssystem hingegen simulativ untersucht, stehen ergänzende Informationen 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.
- 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.

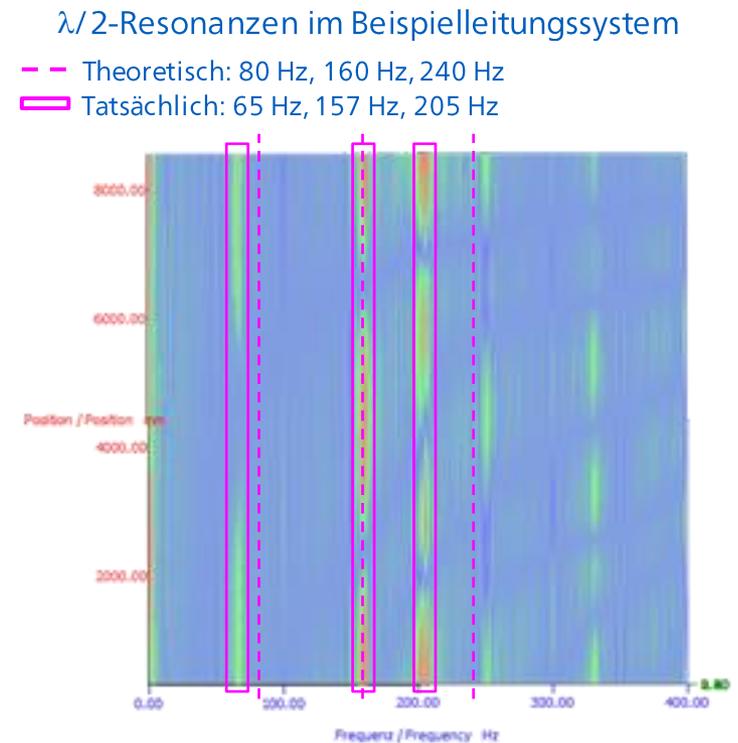
Druckbauchpositionen entlang der Leitungsmittellinie bei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen



Druckschwingungsanalyse hydraulischer Leitungssysteme

Simulative Analyse der Schwingungssituation

- Die weitere Analyse der Schwingungssituation startet gewöhnlich mit der Suche nach $\lambda/2$ - und $\lambda/4$ -Resonanzen, um die Randbedingungen der Schwingungssituation eingrenzen zu können.
- Nach der Theorie sollte die $\lambda/2$ -Resonanz für das 8,1 m lange Beispielleitungssystem bei einer Schallgeschwindigkeit von 1320 m/s bei ca. 80 Hz liegen.
- Sichtbar ist eine $\lambda/2$ -Resonanz aber bereits bei 65 Hz.
- Theoretisch sollten die höheren Ordnungen dieser Schwingung jetzt bei jeweils ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz erkennbar sein, also bei 130 Hz und 195 Hz. Im Druckvektorplot ist jedoch zu erkennen, dass die 2. und 3. Schwingungsordnung bei 157 Hz bzw. 205 Hz liegen.



Die theoretischen Werte gelten für $a = 1310$ m/s und 8,1 m Stahlleitung

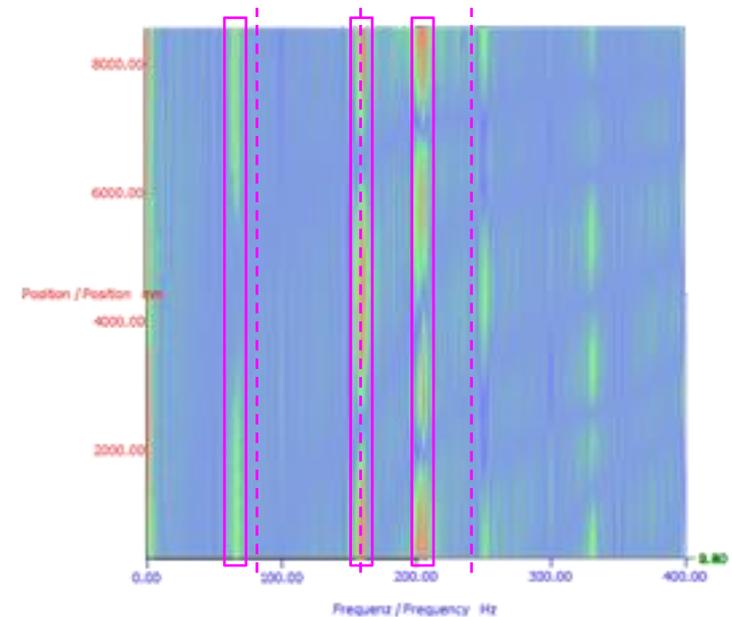
Druckschwingungsanalyse hydraulischer Leitungssysteme

Interpretation

- Die Ursache dieser „Verzerrung“ in der Abfolge der Resonanzfrequenzen ist die Unterteilung der Leitung in Stahl- und PA-Leitungssegmente. Selbst bei gleichen Durchmessern der Segmente bewirkt der Materialwechsel, also das viskoelastische Materialverhalten der PA-Leitungen, 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 Fluiddaten und auf die Materialdaten der Leitungswandungen.
- Eine umfassende Analyse der Schwingungssituation ist dann nur noch mittels der gezeigten simulativen Vorgehensweise möglich.

$\lambda/2$ -Resonanzen im Beispielleitungssystem

- Theoretisch: 80 Hz, 160 Hz, 240 Hz
- █ Tatsächlich: 65 Hz, 157 Hz, 205 Hz



Die theoretischen Werte gelten für $a = 1310$ m/s und 8,1 m Stahlleitung

Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Synthese des viskoelastischen Schlauchwandmodells
- 3 Messung der Vierpol-Übertragungsfunktion
- 4 Identifikation der viskoelastischen Materialparameter
- 5 Druckschwingungsanalyse hydraulischer Leitungssysteme
- 6 Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Der Beitrag präsentierte ein empirisches Rohrwandmodell, mit dem das viskoelastische Materialverhalten von Kunststoff- und Gewebeleitungen in der hydraulischen 1D-Leitungssimulation abgebildet werden kann.
- Am Beispiel einer PA-Leitung wurde die Vorgehensweise beschrieben, wie die viskoelastischen Materialparameter aus Messungen identifiziert und für die simulative Druckschwingungsanalyse genutzt werden.
- Praxisanwendungen bei FLUIDON haben gezeigt, dass die beschriebene Vorgehensweise zur Druckschwingungsanalyse Ergebnisse liefert, die mit einer CFD-Simulation vergleichbar sind, dabei jedoch nur einen Bruchteil von deren Rechenzeit benötigen.
- Wenn es darum geht, eine Effektanalyse durchzuführen oder Abhilfemaßnahmen für ein Druckschwingungsproblem mittels Simulation vorzubereiten, dann ist die präsentierte Methodik hierzu bestens geeignet.
- Aktuell bei FLUIDON laufende Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Verbesserung des Optimierungsergebnisses für die höheren Frequenzbereiche. Die Parameteroptimierung soll dann nicht mehr im Zeitbereich sondern im Frequenzbereich erfolgen.

