

Simulation hydraulischer Leitungssysteme mit DSHplus

Dr.-Ing. Heiko Baum,
FLUIDON GmbH, Aachen

Inhalt

1 Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus

1.1 Fallbeispiel 1: Der Druckstoß

1.2 Visualisierung der Druckschwingung

1.3 Aufbau des Leitungsmodells

1.4 Aufbau des Simulationsmodells

2 Simulation hydraulischer Leitungssysteme

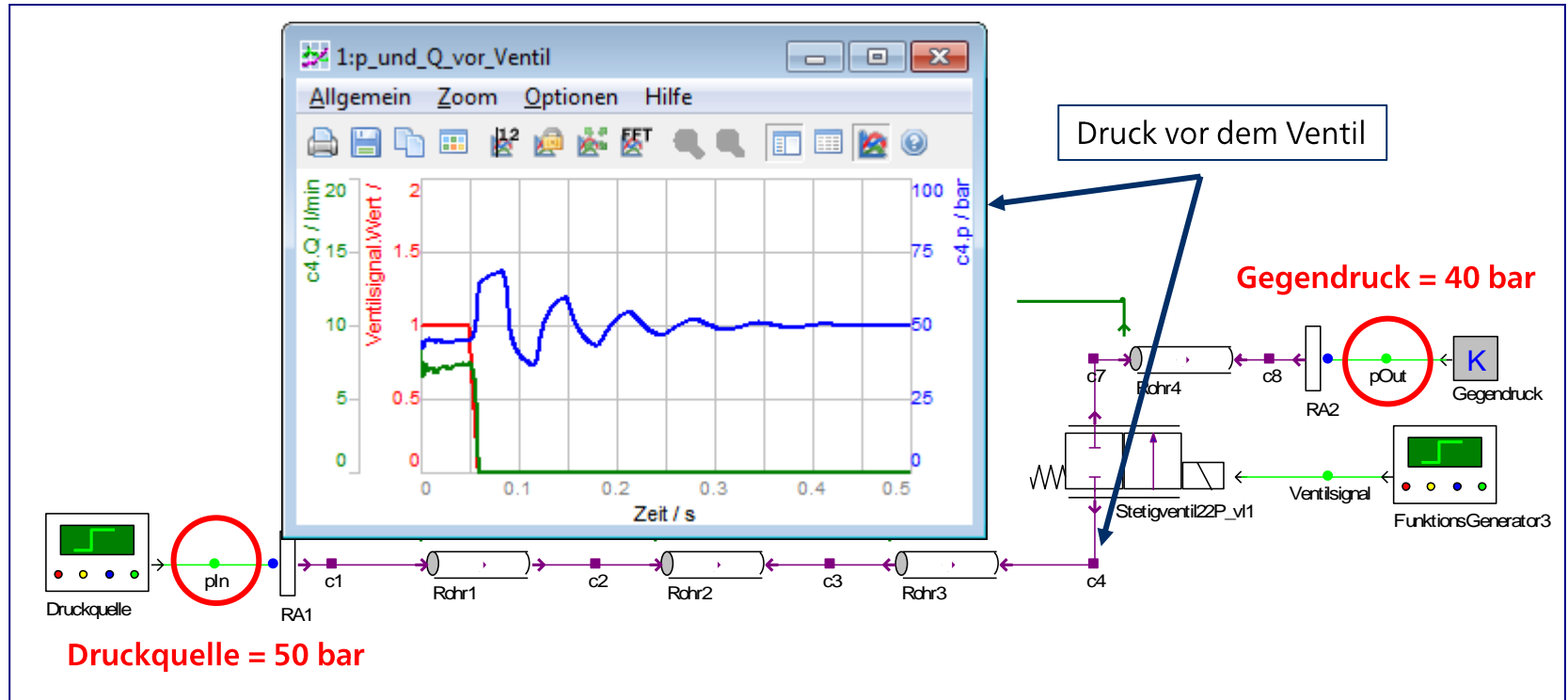
3 Simulation von Dehnschlauchleitungen

4 Modellierung der Systemanregung

Fallbeispiel 1: Der Druckstoß

Zu Beginn der Simulation wird das 30 m lange Rohrleitungssystem von Links nach Rechts durchströmt und befindet sich in einem stationären Zustand

Das Ventil wird sehr schnell geschlossen, wodurch ein Druckstoß entsteht.



Die Visualisierung des Druckstoßes erfolgt über Signalbausteine.

Inhalt

1 Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus

1.1 Fallbeispiel 1: Der Druckstoß

1.2 Visualisierung der Druckschwingung

1.3 Aufbau des Leitungsmodells

1.4 Aufbau des Simulationsmodells

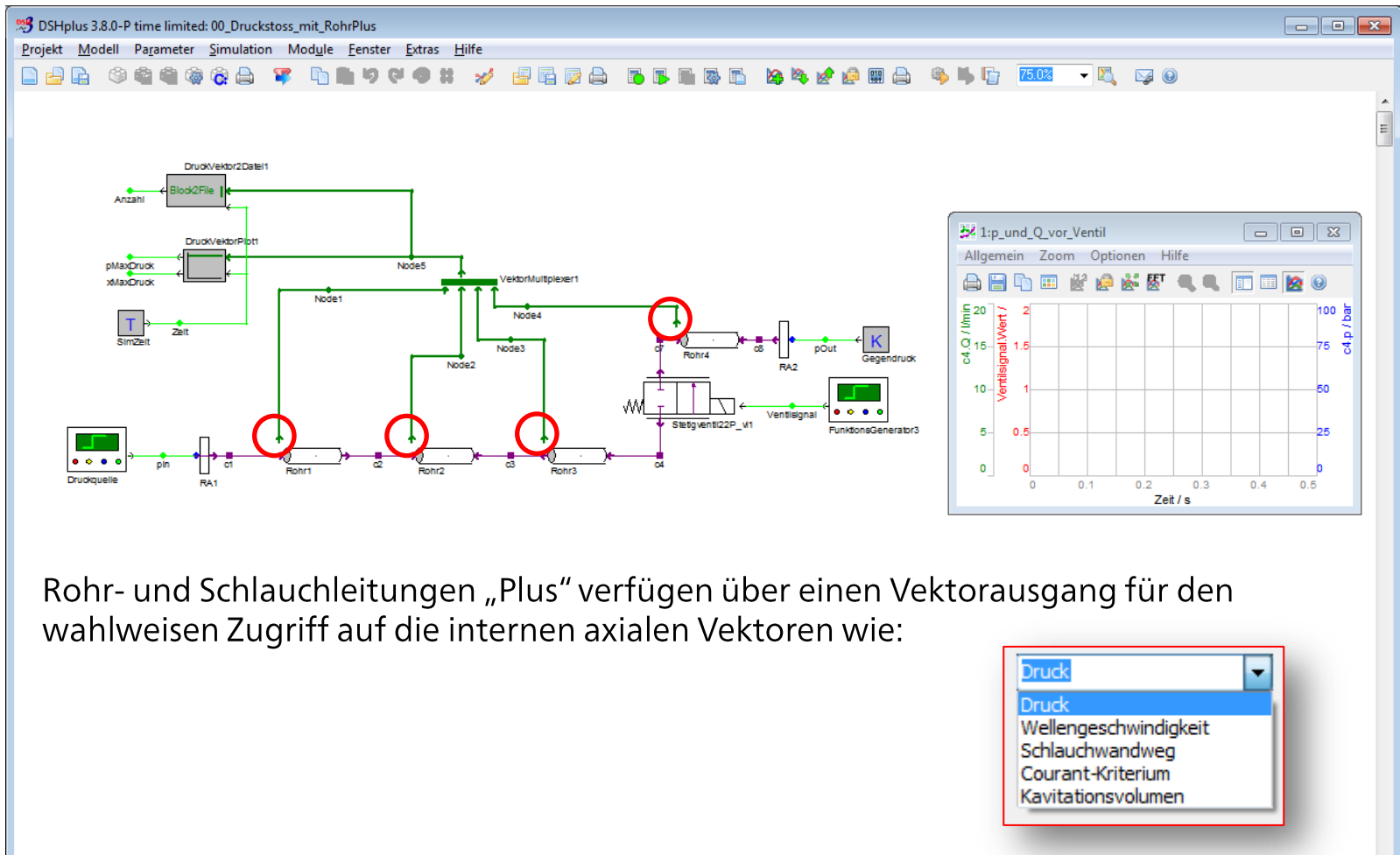
2 Simulation hydraulischer Leitungssysteme

3 Simulation von Dehnschlauchleitungen

4 Modellierung der Systemanregung

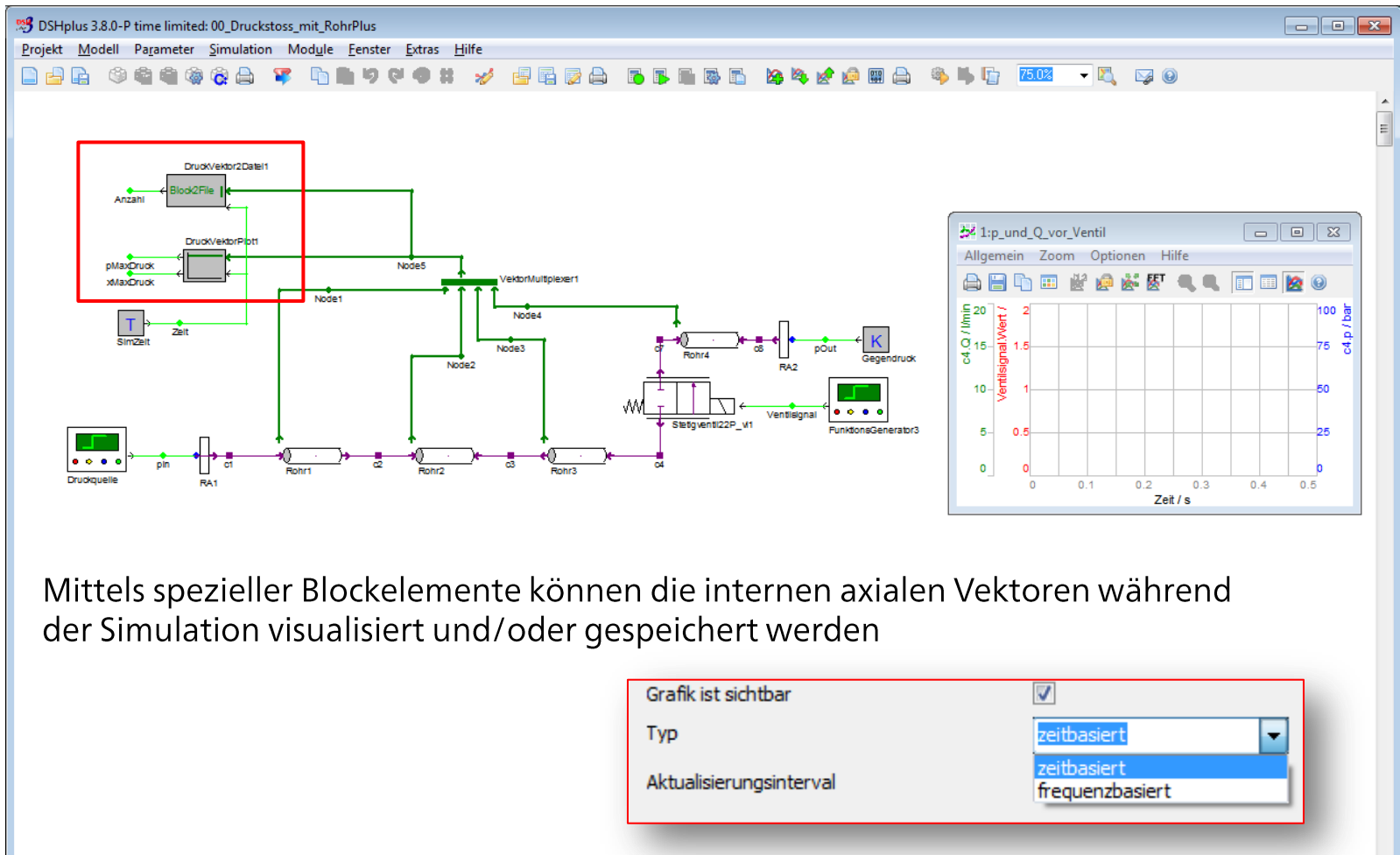
Visualisierung der Druckverteilung in der Leitung

Zugriff auf die internen Zustandsgrößen der Leitungselemente



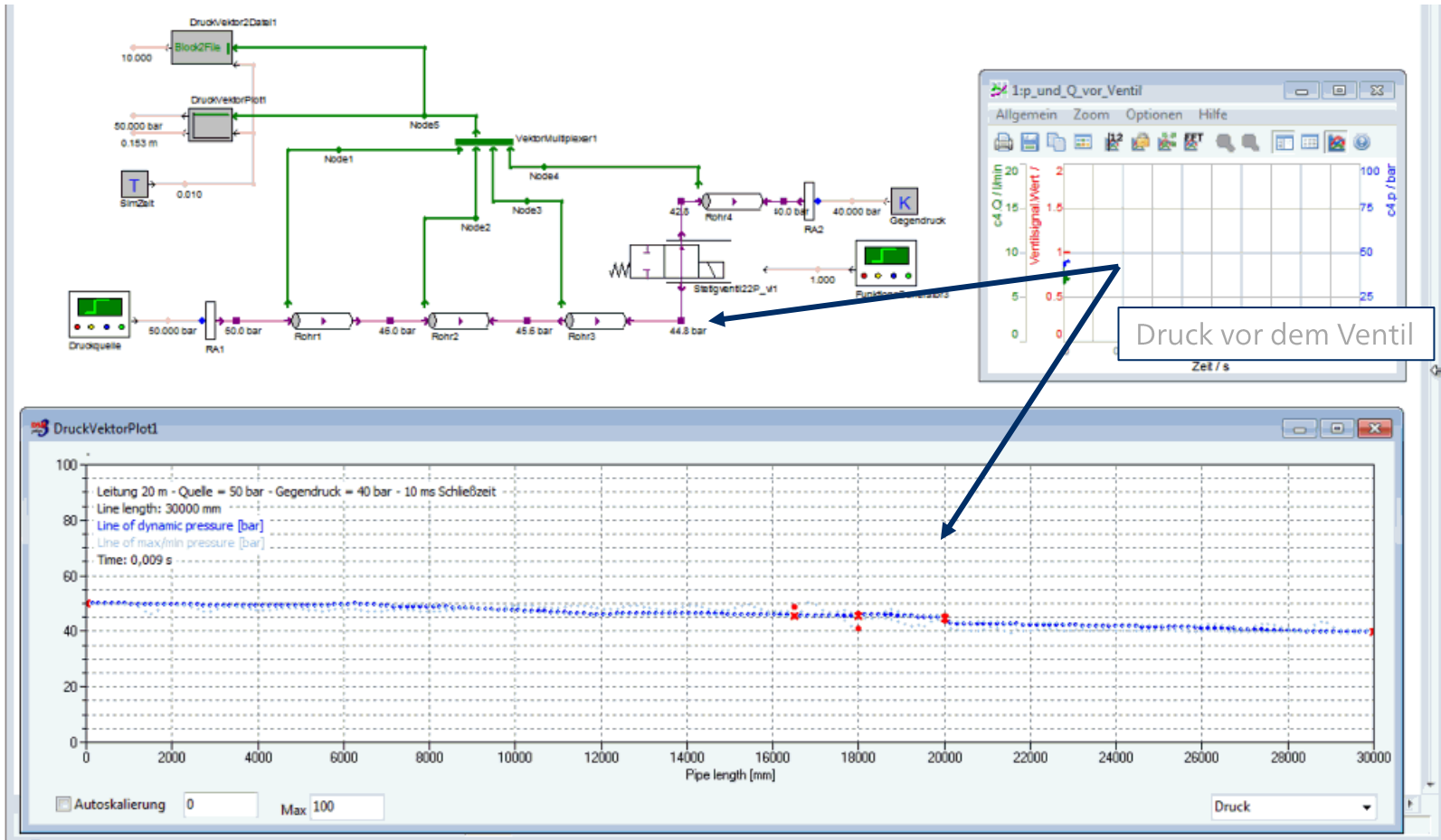
Visualisierung der Druckverteilung in der Leitung

Verarbeitung der internen Zustandsgrößen der Leitungselemente



Visualisierung der Druckverteilung in der Leitung

Simulation des Druckstoßes



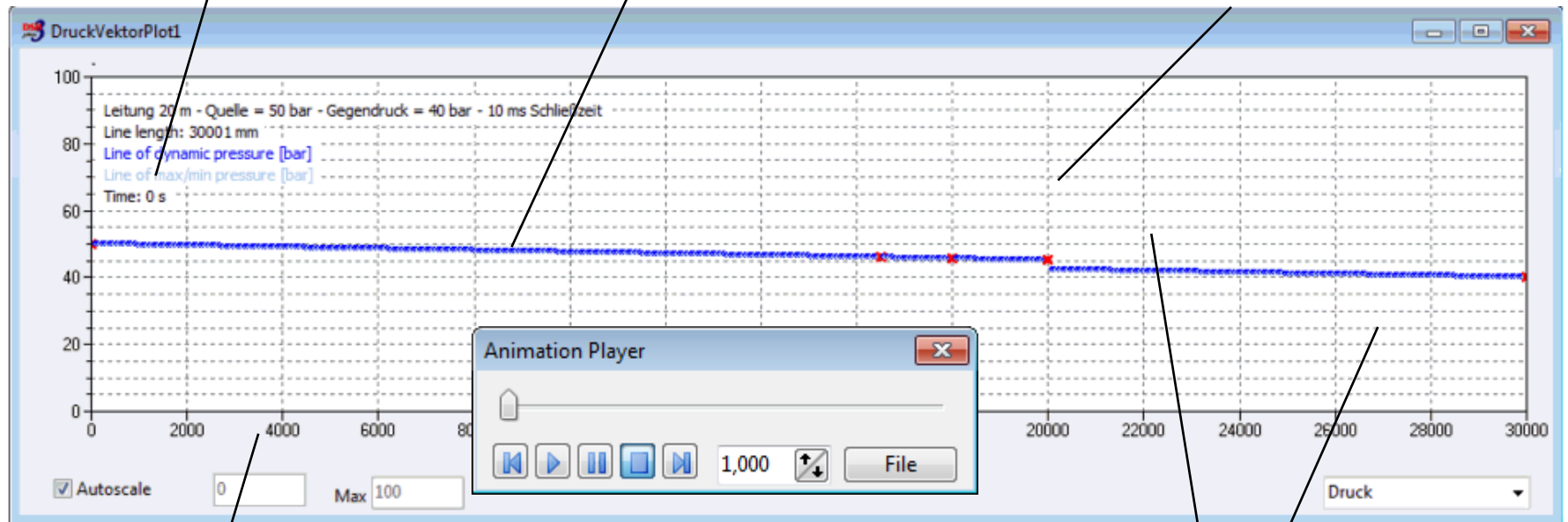
Visualisierung der Druckverteilung in der Leitung

Das Druckvektorplot-Fenster

— Druckwerte der Leitungsmittellinie zum Zeitpunkt x

Anregungsfrequenz oder Simulationszeit

• Knoten markieren Trennstellen zwischen Leitungselementen

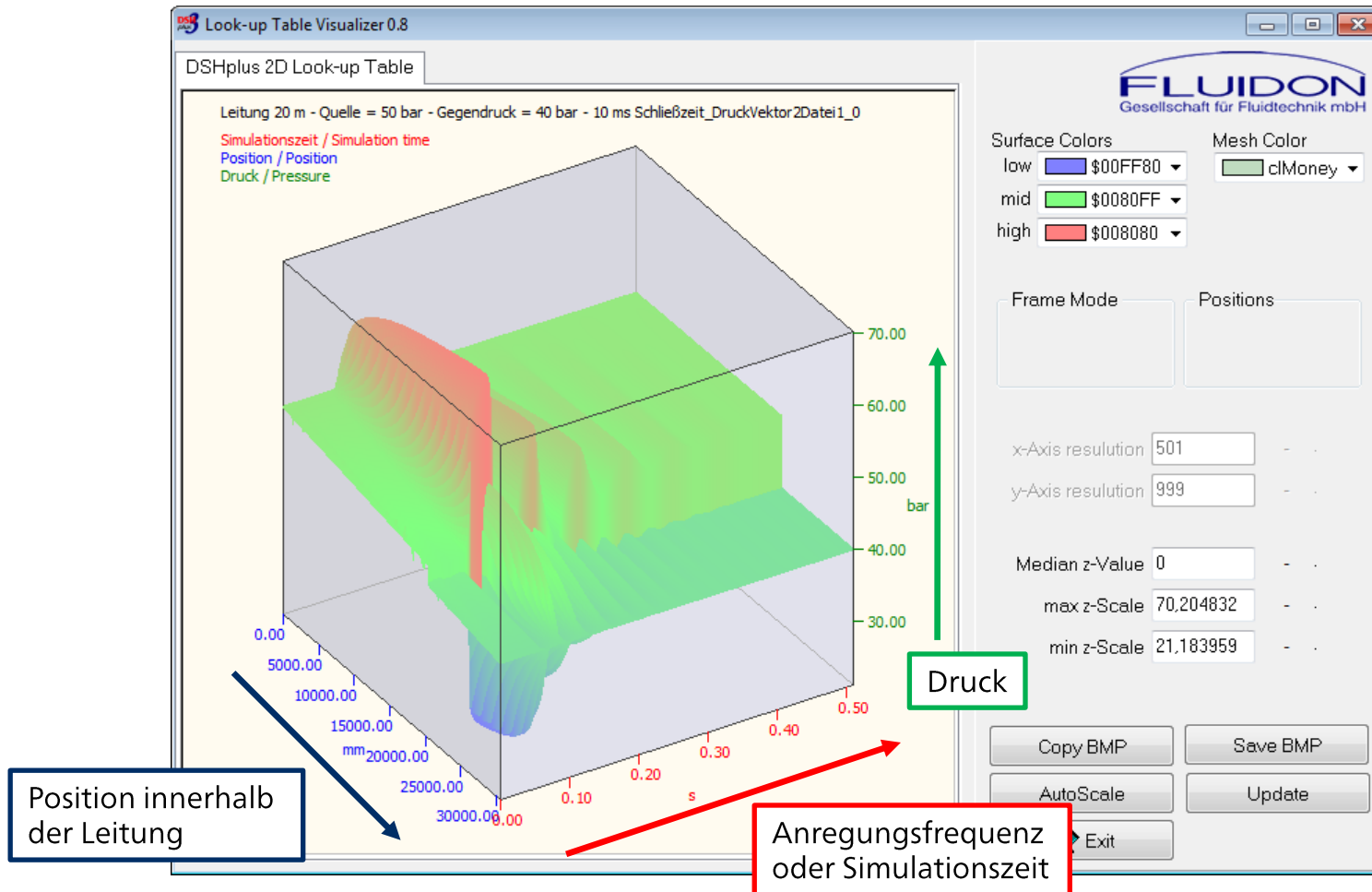


Position innerhalb der Leitung

— Einhüllende Maximal-/Minimaldruck (Peak-hold)

Visualisierung der Druckverteilung in der Leitung

Druck über Anregungsfrequenz oder Simulationszeit und Leitungslänge als 3D-Plot



Inhalt

1 Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus

1.1 Fallbeispiel 1: Der Druckstoß

1.2 Visualisierung der Druckschwingung

1.3 Aufbau des Leitungsmodells

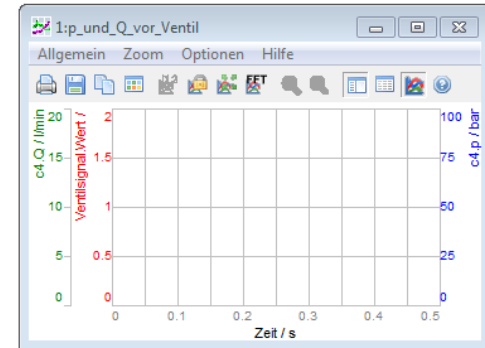
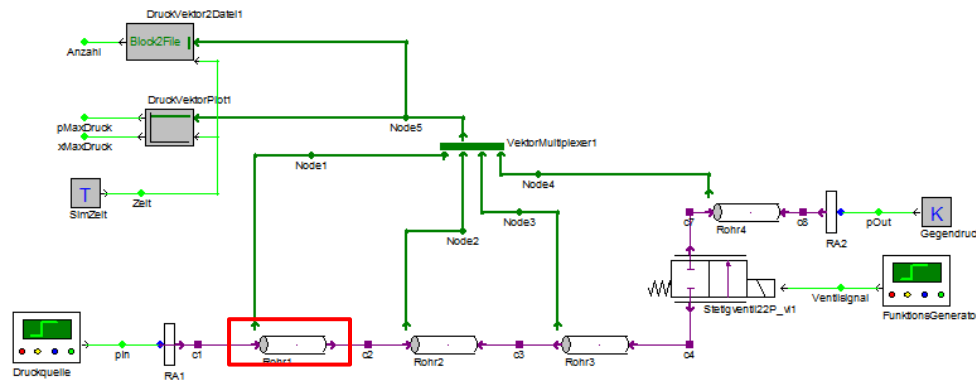
1.4 Aufbau des Simulationsmodells

2 Simulation hydraulischer Leitungssysteme

3 Simulation von Dehnschlauchleitungen

4 Modellierung der Systemanregung

Neuerungen zu Rohr- und Schlauchleitungen in DSHplus



Die Wandelastizität der Rohr- und Schlauchleitung „Plus“ wird generell über Materialparameter beschrieben und bei der Berechnung der Schallgeschwindigkeit verwendet.

Korteweg equation (here for the pipe longitudinally fixed):

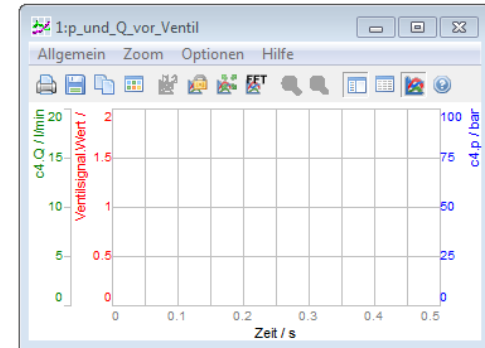
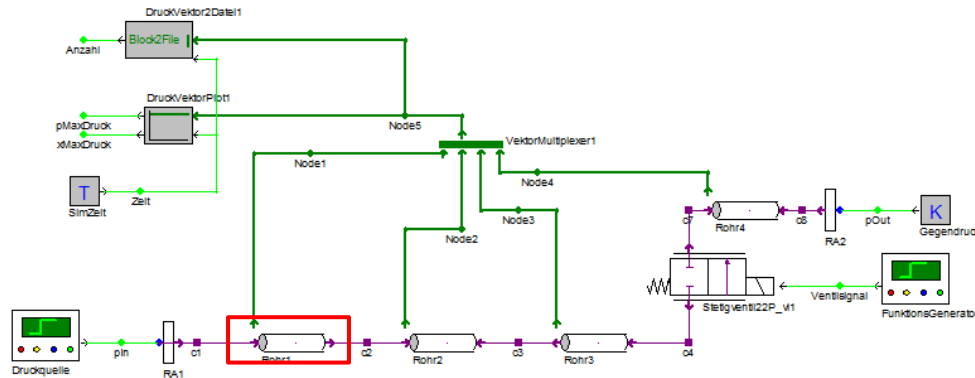
$$c_i = \sqrt{\frac{K}{\rho} \left[1 + (1 - \nu^2) \frac{KD_i}{E_i e_i} \right]^{-1}}$$

where: K - liquid bulk modulus, E - Young's modulus of pipe elasticity, D - pipe diameter, e - pipe wall thickness, ν - contraction coefficient (Poisson ratio) of the pipe material.

Durchmesser	10	mm
Wandstärke	1.5	mm
Querkontraktionszahl des Wandmaterials	0	...
Elastizitätsmodul der Wandung	210000	N/mm ²

Leitung 20 m - Quelle = 50 bar - Gegendruck = 40 bar - 60 ms Schließzeit

Neuerungen zu Rohr- und Schlauchleitungen in DSHplus



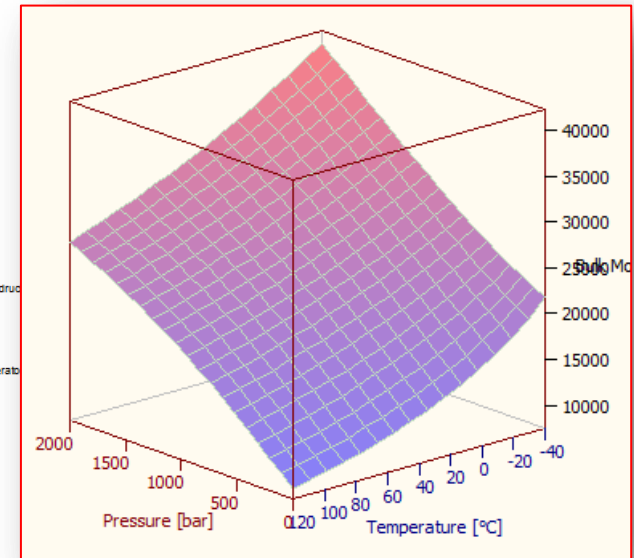
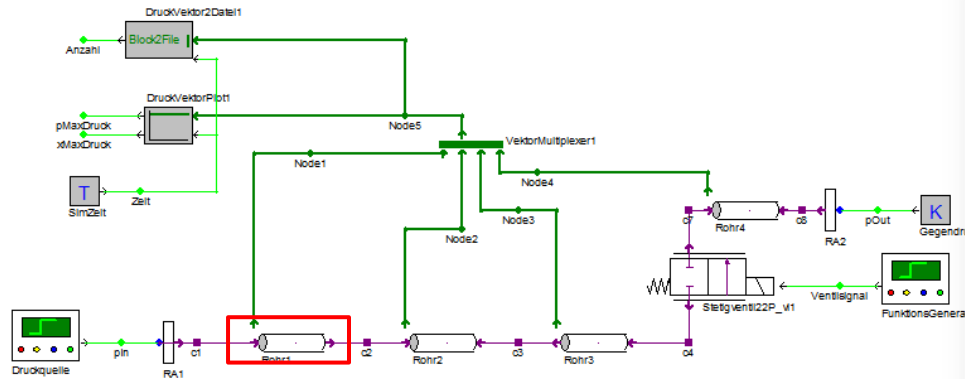
Bei Rohr- und Schlauchleitung „Plus“ kann jetzt ein Anteil ungelöster Luft bei der Berechnung des Ersatzkompressionsmoduls der Flüssigkeit berücksichtigt werden.

$$E'_{\text{Öl}} = \frac{(1 - \alpha) \left(1 + \frac{m \cdot p}{E_{\text{Öl}}} \right)^{-\frac{1}{m}} + \alpha \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1}{n}}}{\frac{1}{E_{\text{Öl}}} (1 - \alpha) \left(1 + \frac{m \cdot p}{E_{\text{Öl}}} \right)^{\frac{m+1}{m}} + \alpha \cdot n \cdot p_0 \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{n+1}{n}}}$$

Anteil ungelöster Luft	<input type="text" value="0.1"/>	%
Polytropenexponent	<input type="text" value="1.1"/>	...

Leitung 20 m - Quelle = 50 bar - Gegendruck = 40 bar - 60 ms Schließzeit

Neuerungen zu Rohr- und Schlauchleitungen in DSHplus



Während der Simulation können bei Rohr- und Schlauchleitung „Plus“ die Fluidparameter kontinuierlich aktualisiert werden.

Gerade bei Simulationen mit ungelöster Luft und niedrigem Druckniveau hat dies einen deutlichen Einfluss auf die Berechnung der Schallgeschwindigkeit.

Korteweg equation (here for the pipe longitudinally fixed):

$$c_i = \sqrt{\left(\frac{K}{\rho} \right) \left[1 + \left(1 - \nu^2 \right) \frac{K D_i}{E_i e_i} \right]^{-1}}$$

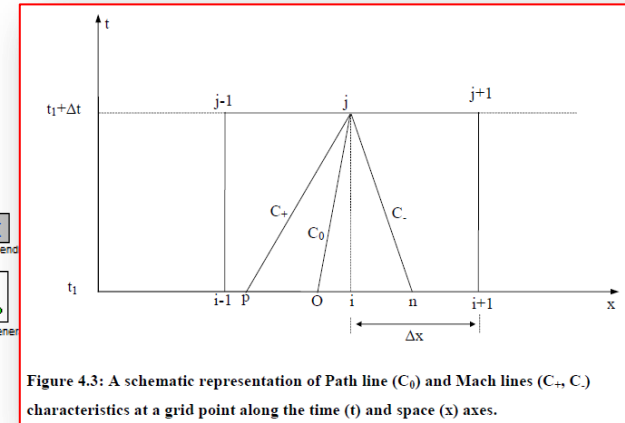
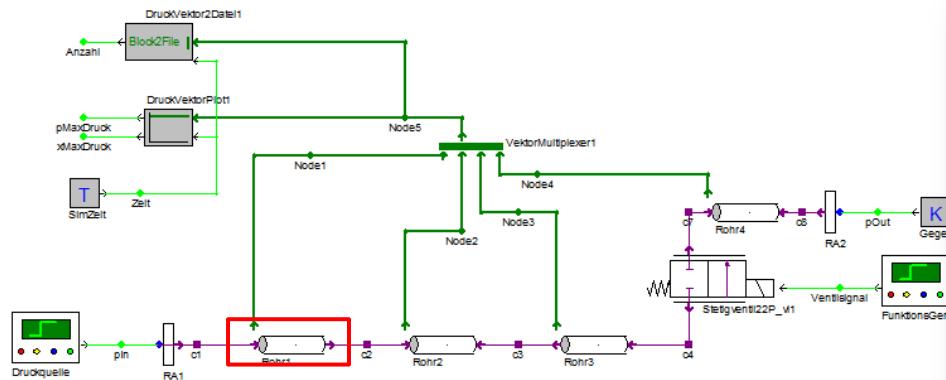
where: K - liquid bulk modulus, E - Young's modulus of pipe elasticity, D - pipe diameter, e - pipe wall thickness, ν - contraction coefficient (Poisson ratio) of the pipe material.

kontinuierliche Fluiddatenaktualisierung

11

Leitung 20 m - Quelle = 50 bar - Gegendruck = 40 bar - 60 ms Schließzeit

Neuerungen zu Rohr- und Schlauchleitungen in DSHplus



Bei der Charakteristengleichung erfolgt die Einteilung des Rechengitters entsprechend dem Courant-Kriterium.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{(|u + a|_{\max})}$$

Ändert sich die Schallgeschwindigkeit a , dann stimmt das initiale Gitter nicht mehr (numerische Instabilität).

Bei Rohr- und Schlauchleitung „Plus“ wird das Courant-Kriterium kontinuierlich überwacht. Jede Leitung kann unabhängig von der globalen Schrittweite in einen Modus mit unteretzter Schrittweite wechseln.

Leitung 20 m - Quelle = 50 bar - Gegendruck = 40 bar - 60 ms Schließzeit

Inhalt

1 Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus

1.1 Fallbeispiel 1: Der Druckstoß

1.2 Visualisierung der Druckschwingung

1.3 Aufbau des Leitungsmodells

1.4 Aufbau des Simulationsmodells

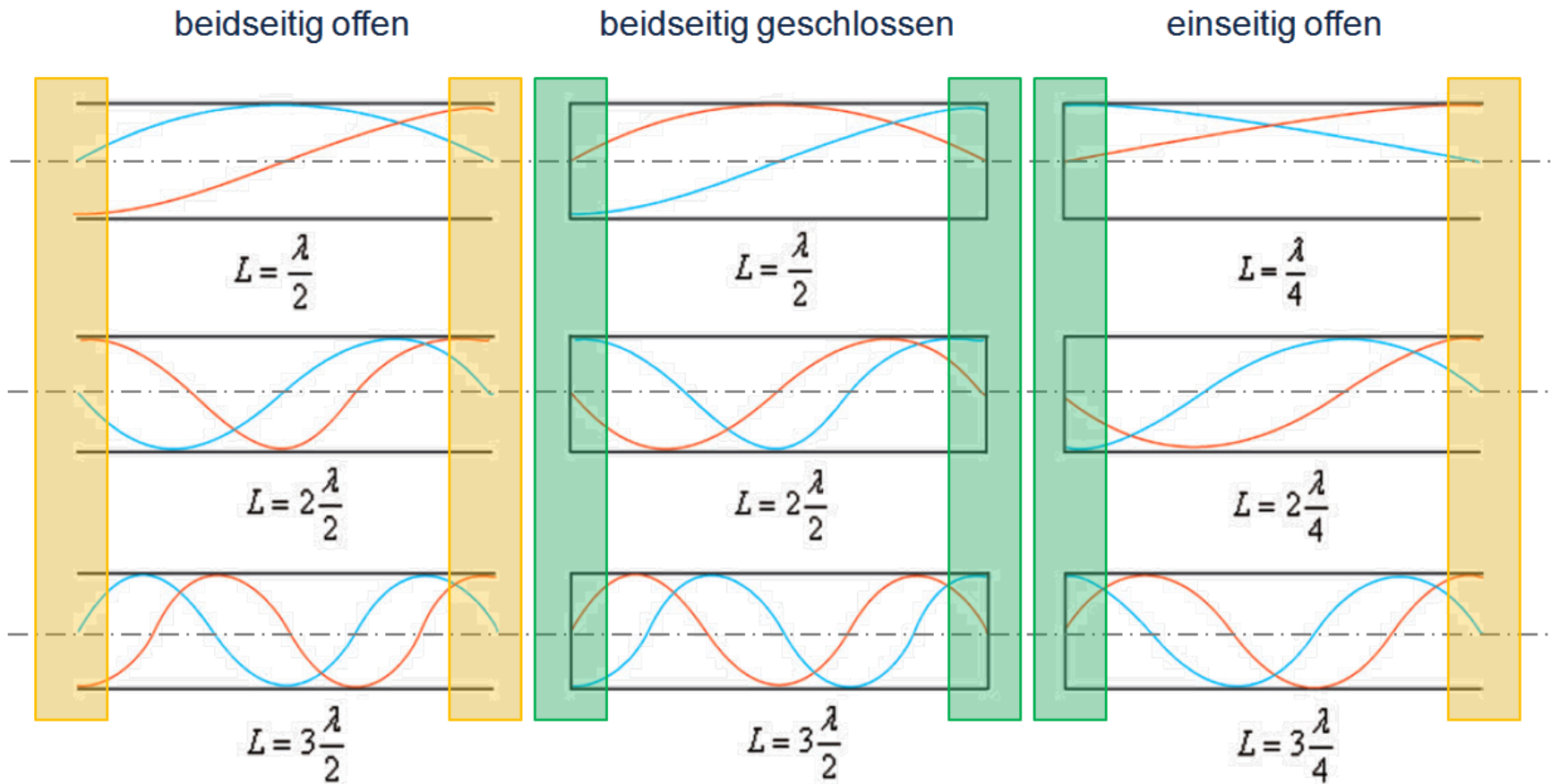
2 Simulation hydraulischer Leitungssysteme

3 Simulation von Dehnschlauchleitungen

4 Modellierung der Systemanregung

Aufbau des Simulationsmodells

Schwingungsrandbedingungen im Leitungssystem



blau = Druck

rot = Volumenstrom

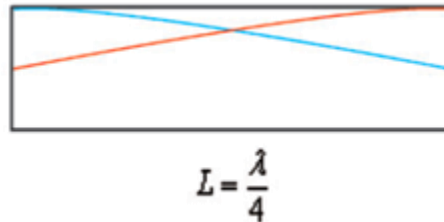
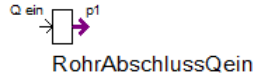
Schwingungsrandbedingung „geschlossen“

Schwingungsrandbedingung „offen“

Aufbau des Simulationsmodells

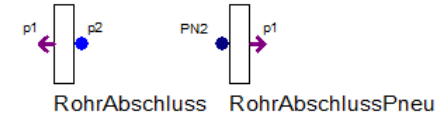
Bauteile für Schwingungsrandbedingungen

„geschlossenes“ Ende



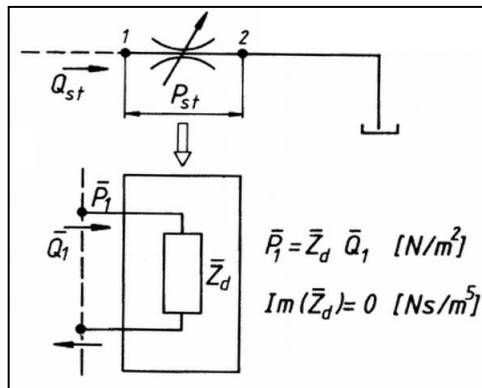
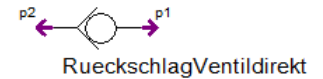
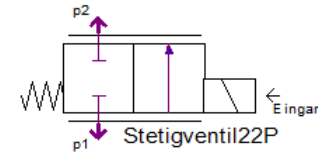
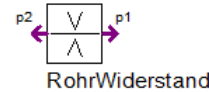
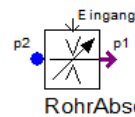
Die Volumenstromfluktuation ist theoretisch Null und die Druckfluktuation ist maximal

„offenes“ Ende

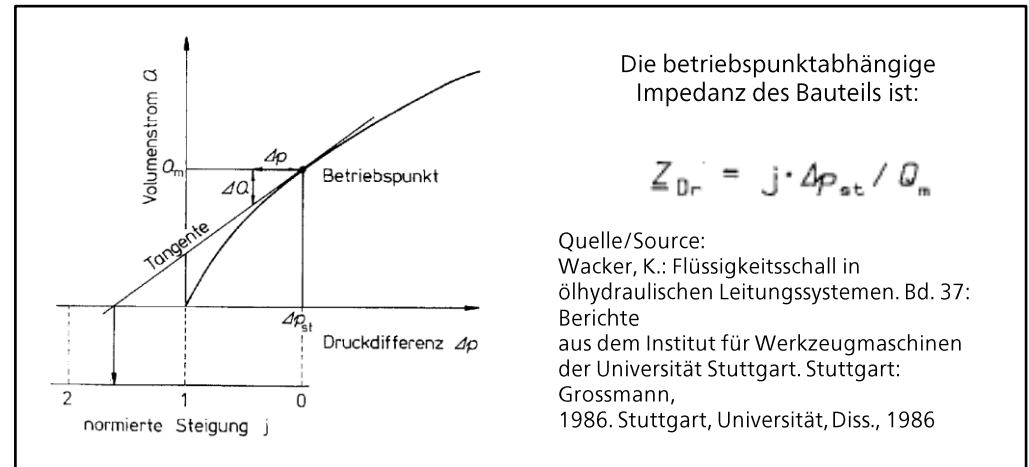


Die Druckfluktuation ist theoretisch Null und die Volumenstromfluktuation ist maximal

„teilweise geschlossenes bzw. offenes“ Ende

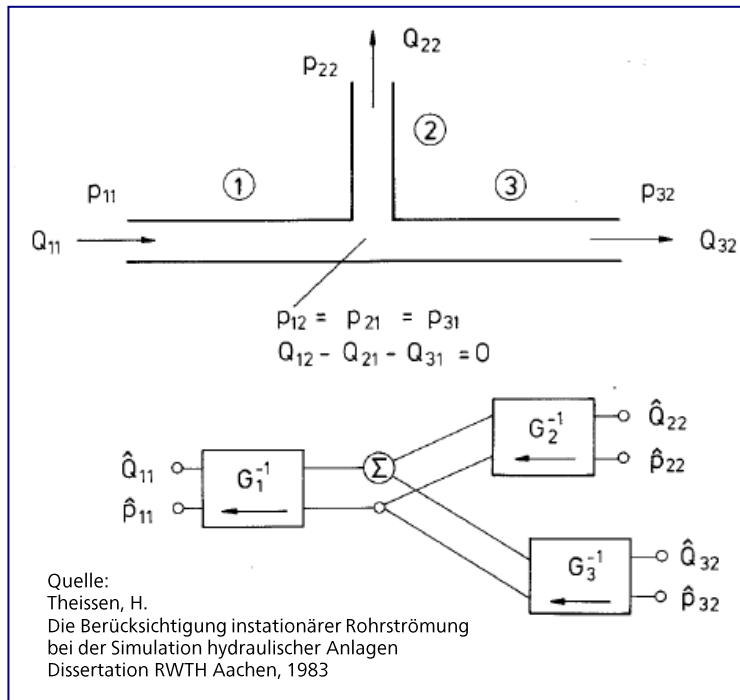
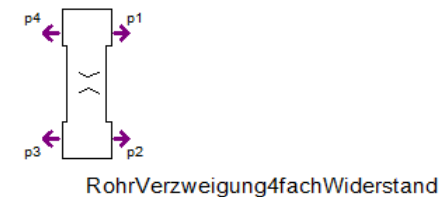
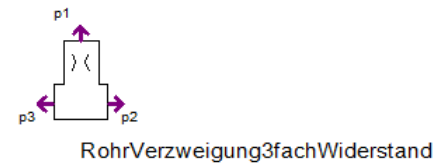
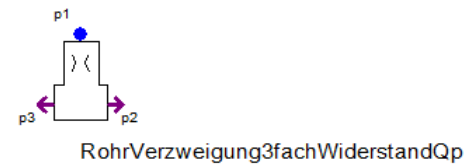
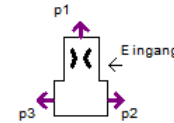
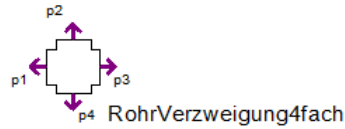
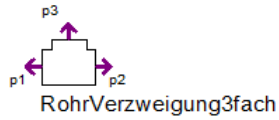


Source:
 Stulemeijer, I.P.J.M.: Beschreibung der Druckschwankungen in hydrostatischen Anlagen und ihre Auswirkungen auf den Luftschall. Eindhoven, Technische Hochschule, Diss., 1981



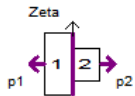
Aufbau des Simulationsmodells

Bauteilverknüpfung – Verzweigungsbauteile



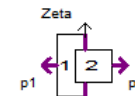
Aufbau des Simulationsmodells

Bauteilverknüpfungen – Druckverlustbauteile



Geometriesprung

Der Impedanzwechsel durch eine Durchmesseränderung wird automatisch bei der Schwingungssimulation berücksichtigt.

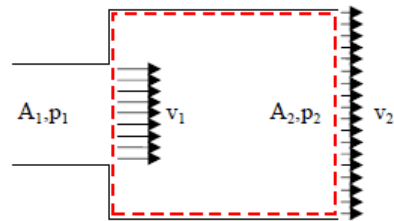


Querschnittsprung

Die Druckverlustbauteile sind nur notwendig, wenn auch der Druckverlust der durchströmten Leitung berechnet werden soll.

Sudden expansion (step diffuser)

Plötzliche Erweiterung (Stufendiffuser)



$$p_2 - p_1 = \frac{A_1}{A_2} \cdot \rho_1 \cdot v_1^2 \cdot \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)$$

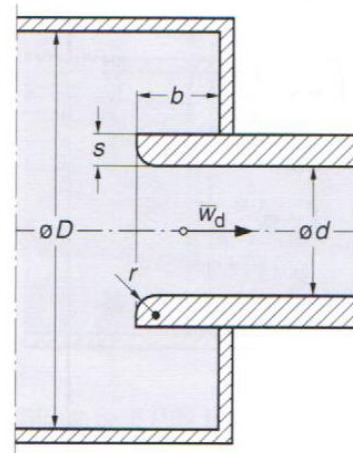
Borda-Carnot Equation

$$\xi_N = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$$

Quelle:
Truckenbrodt, E.
Fluidmechanik: Band 1:
Grundlagen und Elementare Strömungsvorgänge
dichtebeständiger Fluide.
4. Auflage, Springer, Berlin, 2008

Sudden pipe narrowing (step nozzle)

Plötzliche Rohrverengung (Stufendüse)



Quelle:
Wagner, W.
Strömung und Druckverlust
6. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, 2008
ISBN: 978-3-8343-3132-8

$$\Delta p = \xi_d \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \bar{w}_d^2$$

Equation
Gleichung

Randbedingung: $r = 0, b = 0$

$$\xi_{d,0} = 0,5 \cdot (1 - m)^{0,75}$$

$$m = \left(\frac{d}{D}\right)^2$$

Randbedingung: $r = 0, b \neq 0$

$$\xi_{d,b} = \left[c_v - (c_v - 0,5) \cdot \tanh\left(\frac{16,5}{(c_v - 0,5)} \cdot \frac{s}{d}\right) \right] (1 - m)^{0,75}$$

mit:

$$c_v = \left(0,6 \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{0,3} - 0,5\right) \cdot \exp\left(-3,7437 \cdot \frac{b}{d}\right) + 1$$

Randbedingung: $r \neq 0, b \neq 0$

$$\xi_{d,r} = \xi_{d,b} - (\xi_{d,b} - 0,03) \cdot \tanh\left(13,9 \cdot \frac{r}{d}\right)$$

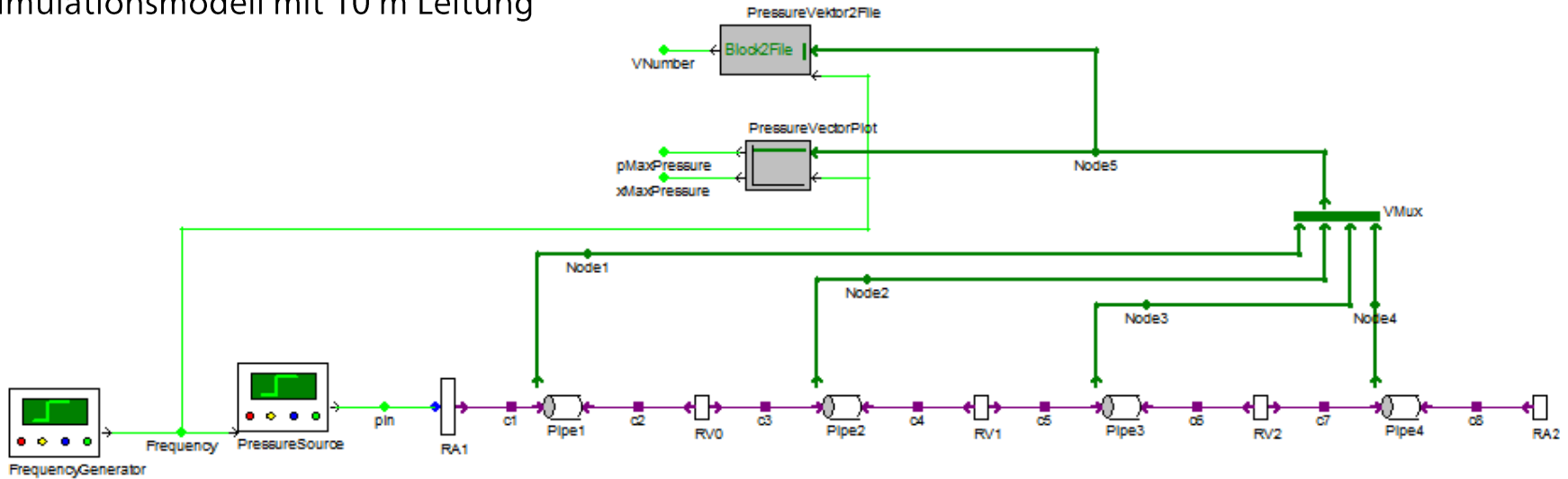
Inhalt

- 1** Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus
- 2** Simulation hydraulischer Leitungssysteme
 - 2.1** Analyse der Druckschwingung
 - 2.2 Übersicht möglicher Dämpfer
 - 2.3 Auslegung eines $\lambda/4$ -Resonators
 - 2.4 Auslegung eines Helmholtz-Resonators
 - 2.5 Messung und Simulation einer Expansionskammer
- 3** Simulation von Dehnschlauchleitungen
- 4** Modellierung der Systemanregung

Analyse der Druckschwingung

Druckanregung – Leitung ist am Ende geschlossen

Simulationsmodell mit 10 m Leitung



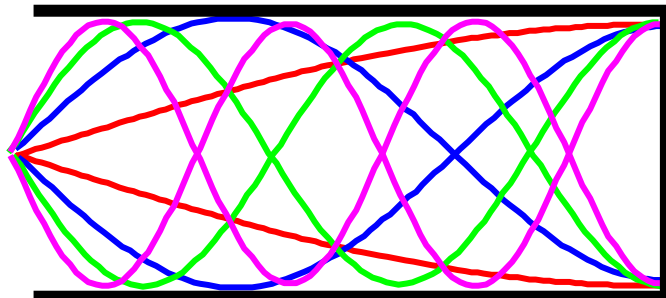
Benötigte Gleichungen

$$\lambda = \frac{4L}{2n+1}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \infty$$

$$f = \frac{c_{Fluid}}{\lambda} = \frac{2n+1}{4L} c_{Fluid}$$

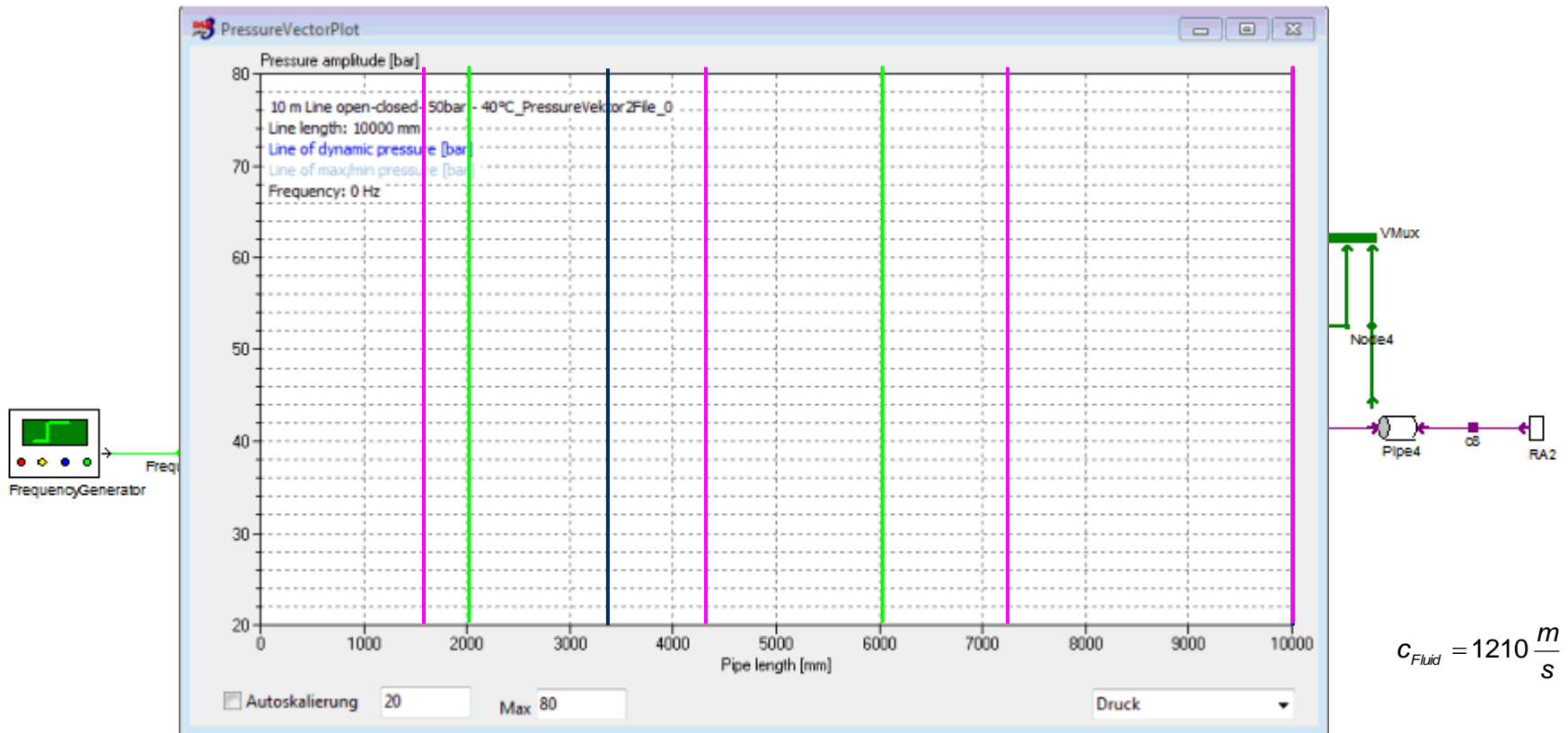
Theoretische Schwingungsformen

$n = 4$



Analyse der Druckschwingung

Druckanregung – Leitung ist am Ende geschlossen



Druckbauchposition

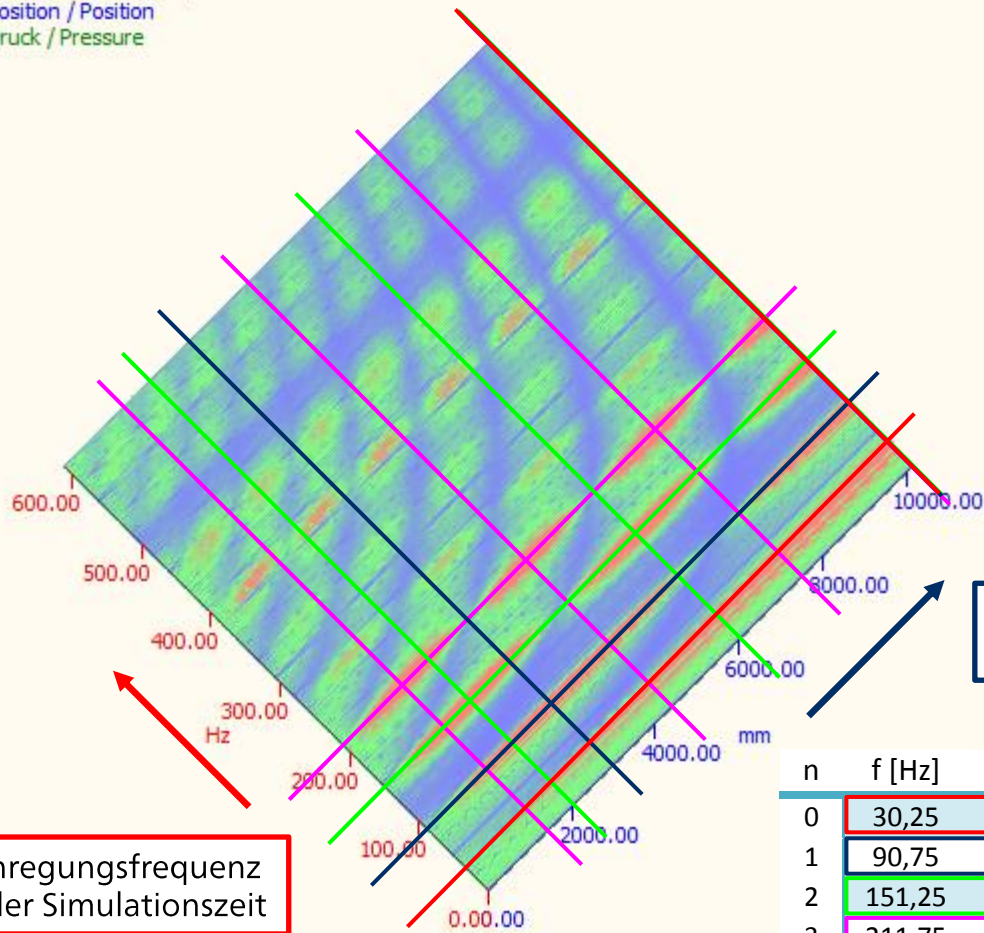
$$x_{Antinode} = \frac{(1+2i)}{(2n+1)} L, \quad i=0,1,2, \dots n$$

n	f [Hz]	λ [m]	Druckbauchpositionen / Antinode Positions [m]				
0	30,25	40,00	10,00				
1	90,75	13,33	3,33	10,00			
2	151,25	8,00	2,00	6,00	10,00		
3	211,75	5,71	1,43	4,29	7,14	10,00	
4	272,25	4,44	1,11	3,33	5,56	7,78	10,00

Analyse der Druckschwingung

Druckanregung – Leitung ist am Ende geschlossen

Frequenz / Frequency
Position / Position
Druck / Pressure



Anregungsfrequenz
oder Simulationszeit

Position innerhalb
der Leitung

Druckbauchposition

$$x_{Antinode} = \frac{(1+2i)}{(2n+1)} L, \quad i=0,1,2, \dots n$$

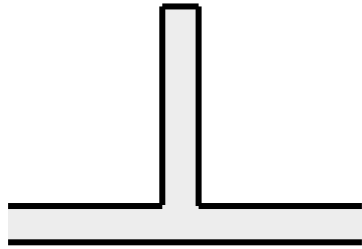
$$c_{Fluid} = 1210 \frac{m}{s}$$

n	f [Hz]	λ [m]	Druckbauchpositionen / Antinode Positions [m]				
0	30,25	40,00	10,00				
1	90,75	13,33	3,33	10,00			
2	151,25	8,00	2,00	6,00	10,00		
3	211,75	5,71	1,43	4,29	7,14	10,00	
4	272,25	4,44	1,11	3,33	5,56	7,78	10,00

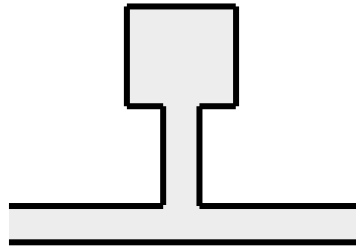
Inhalt

- 1** Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus
- 2** Simulation hydraulischer Leitungssysteme
 - 2.1** Analyse der Druckschwingung
 - 2.2** Übersicht möglicher Dämpfer
 - 2.3 Auslegung eines $\lambda/4$ -Resonators
 - 2.4 Auslegung eines Helmholtz-Resonators
 - 2.5 Messung und Simulation einer Expansionskammer
- 3 Simulation von Dehnschlauchleitungen
- 4 Modellierung der Systemanregung

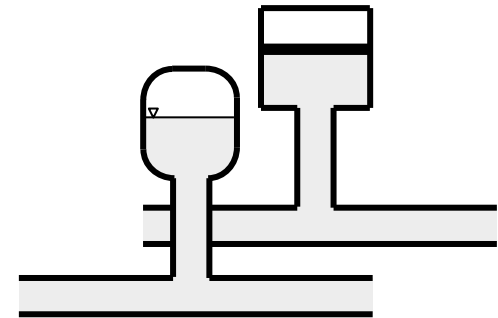
Übersicht möglicher Dämpfer



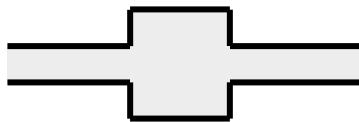
Abzweig-Resonator



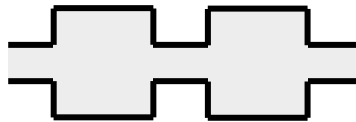
Volumen Resonator
(Helmholtz Resonator)



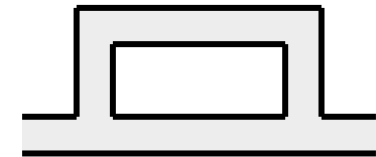
Volumen Resonators mit
Gasblase oder Kolben



Expansionskammer



Doppelte Expansions-
kammer



Interferenzleitung

Tipps und Tricks zur Simulation von Leitungssystemen

The screenshot displays the FLUIDON website interface, which is organized into several key sections:

- Navigation:** A top menu bar includes links for Home, Software, Services, Applications, News & Events, Support, Downloads, and Company. A secondary menu below it lists specific technical topics: Side-Branch Resonator, Volume Resonator, Exp. Chamber, and Quincke Tube.
- Knowledge Base:** A central section titled 'Knowledge Base' provides links to various technical topics: Network Pressure Losses, Hydraulic Line Resonance, Pulsation Dampers, and Water Hammer Simulation. It also lists service categories: Engineering Services, Simulation Services, and Program Services.
- Technical Diagrams:** The main content area features six schematic diagrams of hydraulic components:
 - Side-Branch Resonator
 - Volume Resonator (Helmholtz Resonator)
 - Volume Resonators with Gas Bladder or Piston
 - Expansion Chamber
 - Multiple Expansion Chamber
 - Quincke Tube
- Textual Content:**
 - A paragraph explains that the task of pulsation dampers is to attenuate pressure fluctuations in hydraulic or pneumatic networks, achieved through absorption silencers or reflection dampers.
 - Another paragraph notes that for maximum attenuation, damper design must align with the required resonant frequency, and placement should be at a position of maximum pressure fluctuation.
- Additional Elements:**
 - A sidebar on the left contains a search bar, a 'Common' section with links to privacy statements and contact information, and a login form with fields for Username and Password.
 - On the right, there is a promotional banner for 'DSHplus 3.7' software, including information about workshops in Aachen, Germany, and a 'Free Version' (Personal Edition) offer.

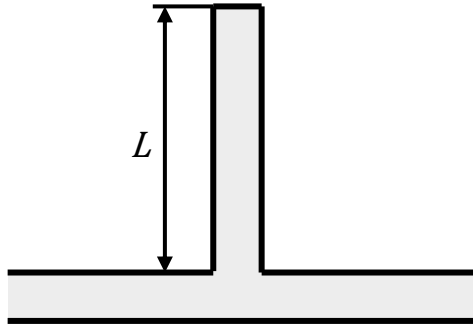
Inhalt

- 1** Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus
- 2** Simulation hydraulischer Leitungssysteme
 - 2.1** Analyse der Druckschwingung
 - 2.2** Übersicht möglicher Dämpfer
 - 2.3** Auslegung eines $\lambda/4$ -Resonators
 - 2.4 Auslegung eines Helmholtz-Resonators
 - 2.5 Messung und Simulation einer Expansionskammer
- 3 Simulation von Dehnschlauchleitungen
- 4 Modellierung der Systemanregung

Auslegung eines 1/4-Resonators

Skizze – Gleichung – Simulationsmodell

Skizze des Resonators

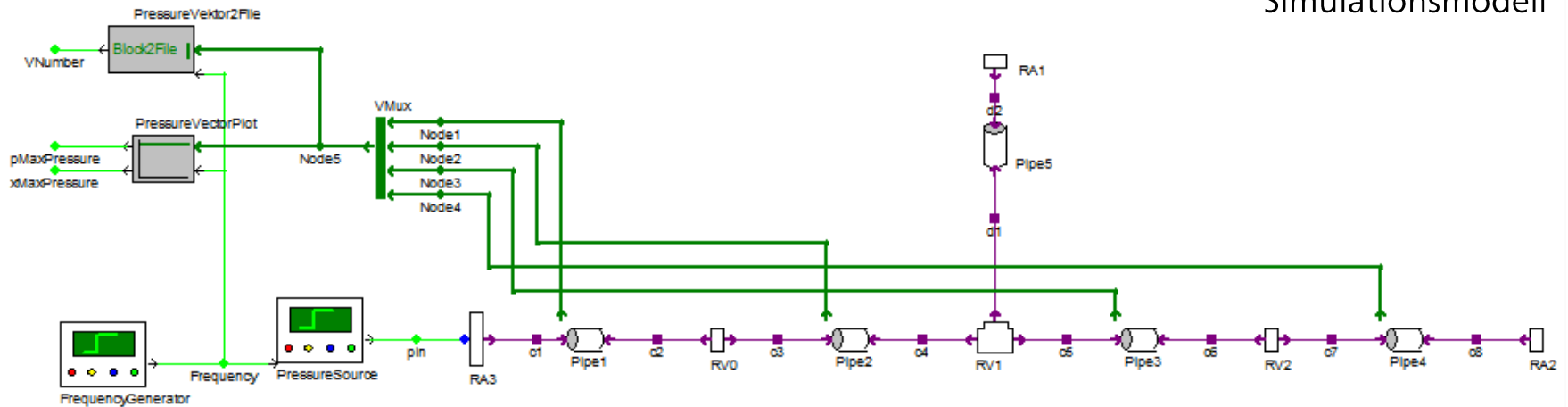


Benötigte Gleichungen

$$f = \frac{c}{4L}$$

mit: c Schallgeschwindigkeit im Fluid
 L Länge des Abzweigs

Simulationsmodell



Auslegung eines 1/4-Resonators

Dimensionierung und Positionierung

Simulationsaufgabe: In einer 10 m Stahlleitung liegt die dritte Eigenfrequenz bei ca. 151 Hz.

Diese Frequenz soll durch einen $\lambda/4$ -Resonator gedämpft werden.

$$L_{\text{Side Branch}} = \frac{c}{4f} = \frac{1210 \frac{m}{s}}{4 * 151 \frac{1}{s}} = 2,0m$$

Der $\lambda/4$ -Resonator ist an einer Schwindungsbauchposition am effektivsten

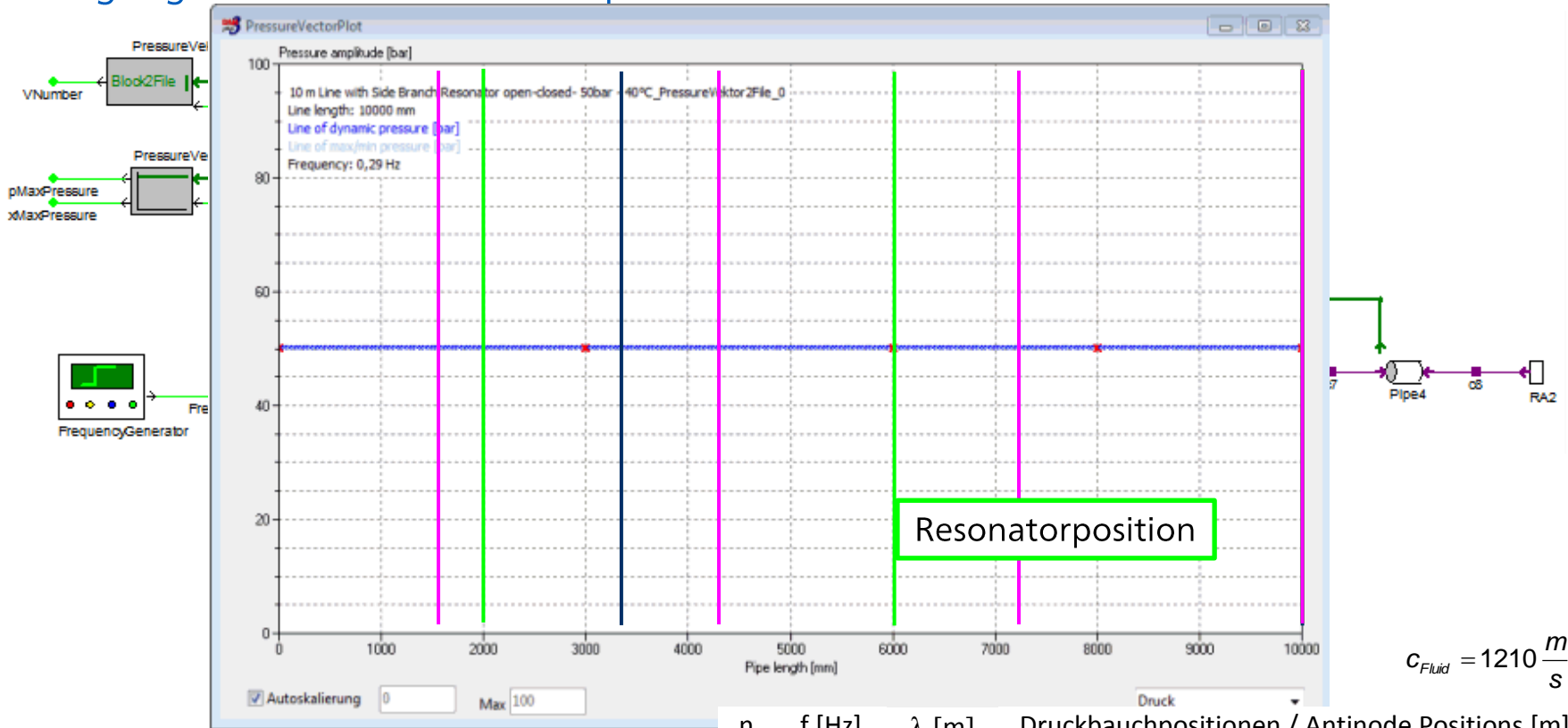
Druckbauchpositionen in einer 10 m Leitung

$$x_{\text{Druckbauch}} = \frac{(1+2i)}{(2n+1)} L, \quad i=0,1,2, \dots n$$

n	f [Hz]	λ [m]	Druckbauchpositionen / Antinode Positions [m]				
0	30,25	40,00	10,00				
1	90,75	13,33	3,33	10,00			
2	151,25	8,00	2,00	6,00	10,00		
3	211,75	5,71	1,43	4,29	7,14	10,00	
4	272,25	4,44	1,11	3,33	5,56	7,78	10,00

Auslegung eines I/4-Resonators

Anregung durch einen Drucksweep



Druckbauchpositionen in der 10 m Leitung

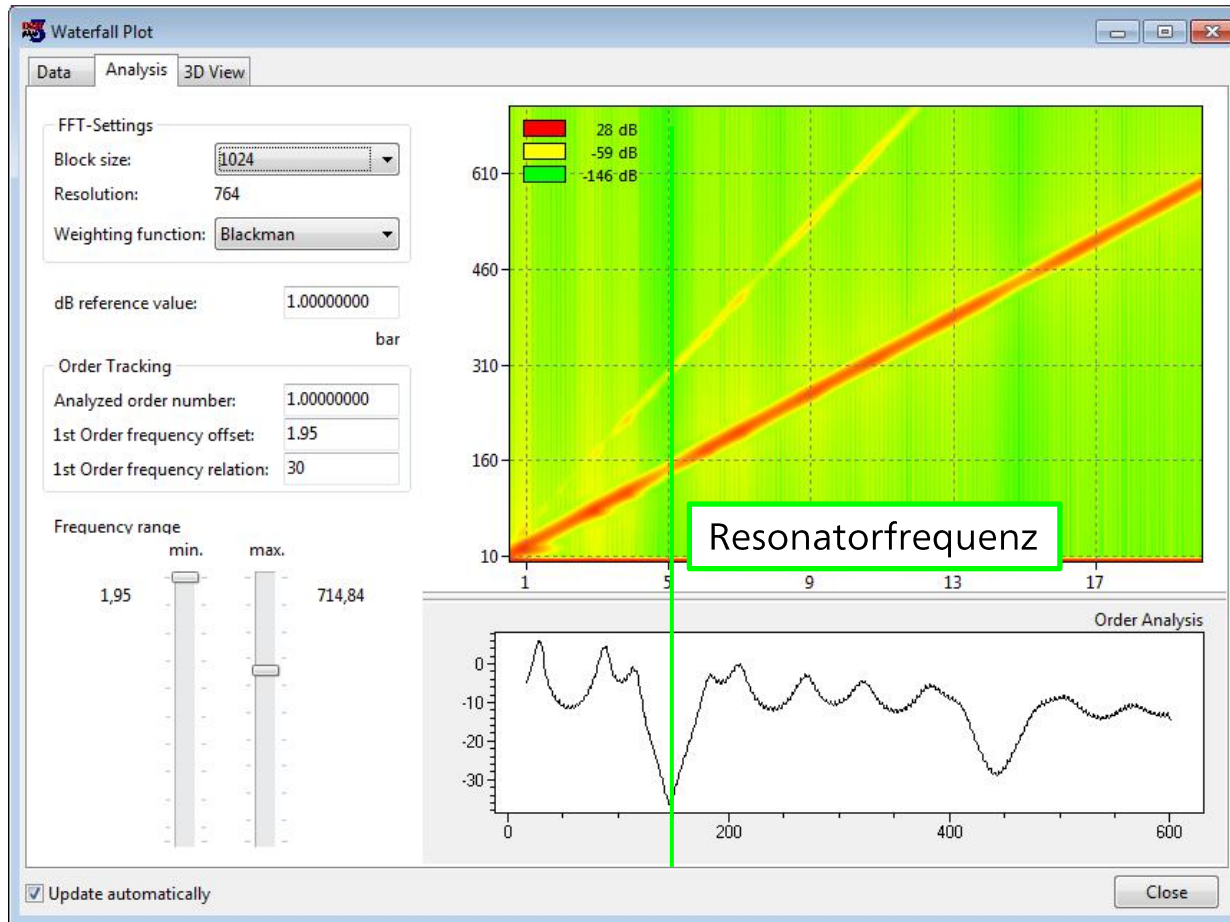
$$x_{Antinode} = \frac{(1+2i)}{(2n+1)} L, \quad i=0,1,2, \dots, n$$

n	f [Hz]	λ [m]	Druckbauchpositionen / Antinode Positions [m]				
0	30,25	40,00	10,00				
1	90,75	13,33	3,33	10,00			
2	151,25	8,00	2,00	6,00	10,00		
3	211,75	5,71	1,43	4,29	7,14	10,00	
4	272,25	4,44	1,11	3,33	5,56	7,78	10,00

Auslegung eines 1/4-Resonators

Analyse mittels Campell-Diagramm

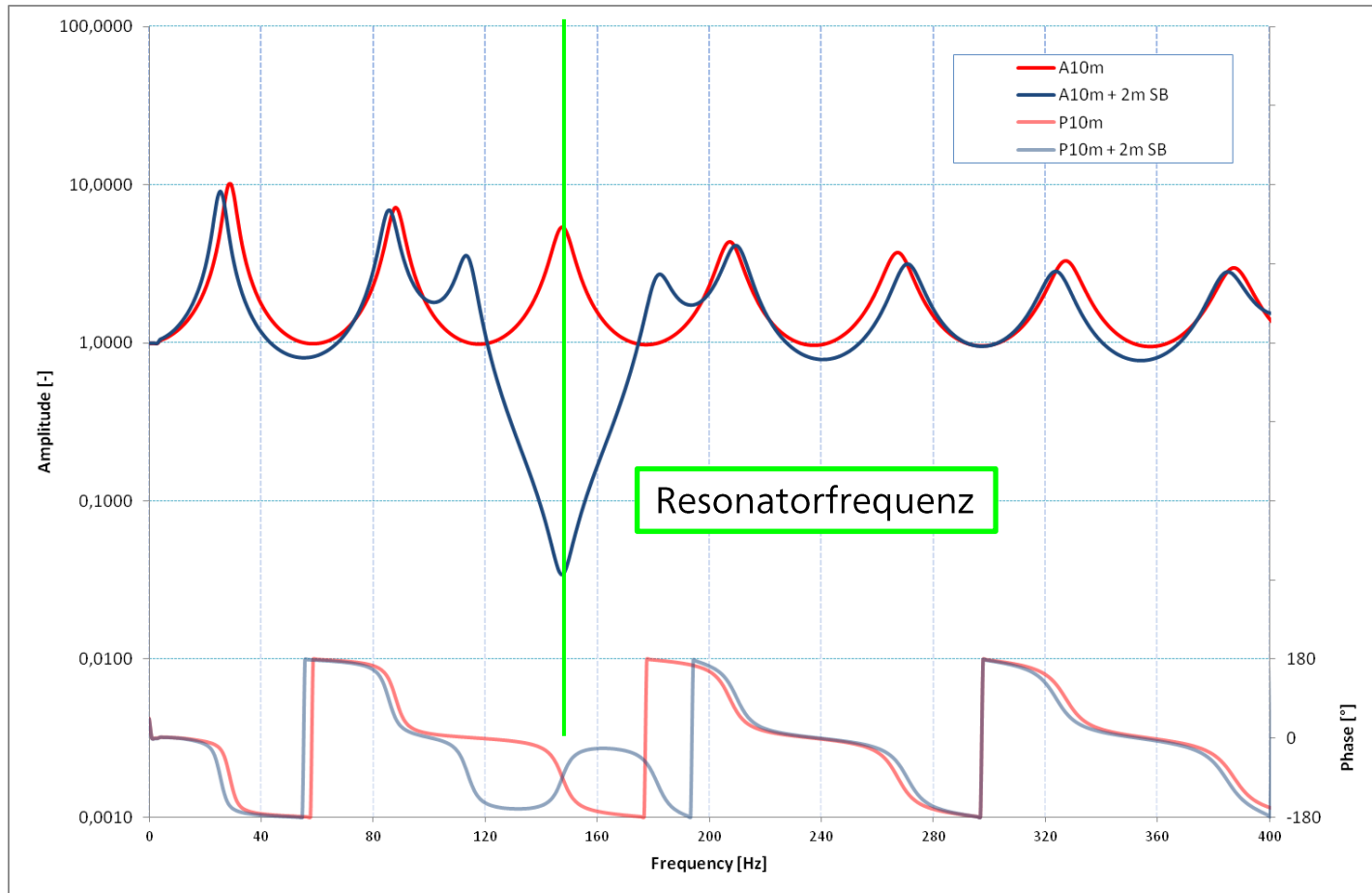
Ordnungsanalyse des Druckes an der Leitungsendposition



Auslegung eines 1/4-Resonators

Analyse mittels Übertragungsfunktion

Übertragungsfunktion einer 1 m Stahlleitung und einer 10 m Stahlleitung mit 2 m Lambda/4-Resonator



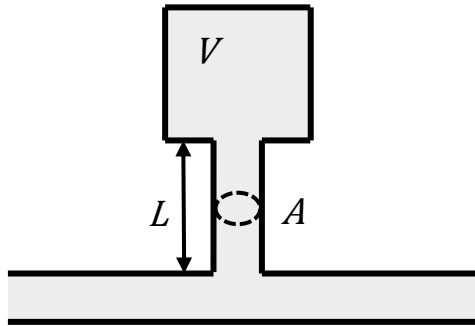
Inhalt

- 1** Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus
- 2** Simulation hydraulischer Leitungssysteme
 - 2.1** Analyse der Druckschwingung
 - 2.2** Übersicht möglicher Dämpfer
 - 2.3** Auslegung eines $\lambda/4$ -Resonators
 - 2.4** Auslegung eines Helmholtz-Resonators
 - 2.5 Messung und Simulation einer Expansionskammer
- 3 Simulation von Dehnschlauchleitungen
- 4 Modellierung der Systemanregung

Auslegung eines Helmholtz-Resonators

Skizze – Gleichung – Simulationsmodell

Skizze des Resonators

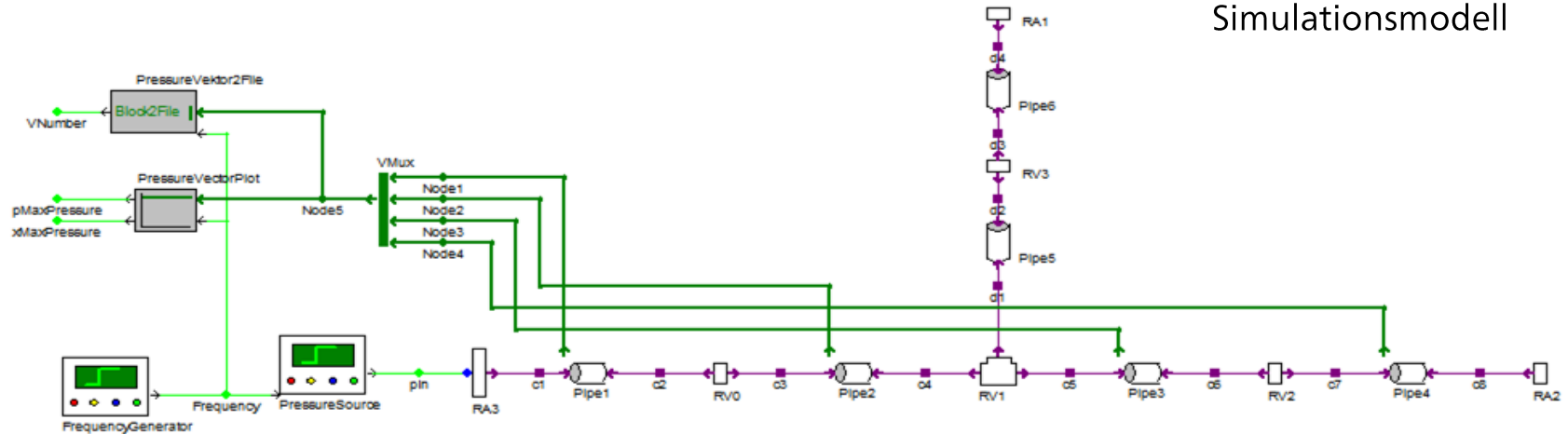


Benötigte Gleichung

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{LV}}$$

mit:

- c Schallgeschwindigkeit im Fluid
- L Länge der Zuleitung
- A Querschnittsfläche der Zuleitung
- V Volumen des Resonators



Simulationsmodell

Auslegung eines Helmholtz-Resonators

Dimensionierung und Positionierung

Simulationsaufgabe: In einer 10 m Stahlleitung liegt die dritte Eigenfrequenz bei ca. 151 Hz.

Diese Frequenz soll durch einen hydraulischen Helmholtz-Resonator gedämpft werden.

$$f_{\text{Helmholtz}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{LV}} = \frac{1210 \left(\frac{100 \text{ cm}}{\text{s}}\right)}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{0,785 \text{ cm}^2}{25 \text{ cm} \cdot 510,5 \text{ cm}^3}} = 151 \text{ Hz}$$

Der Helmholtz-Resonator ist an einer Schwindungsbauchposition am effektivsten

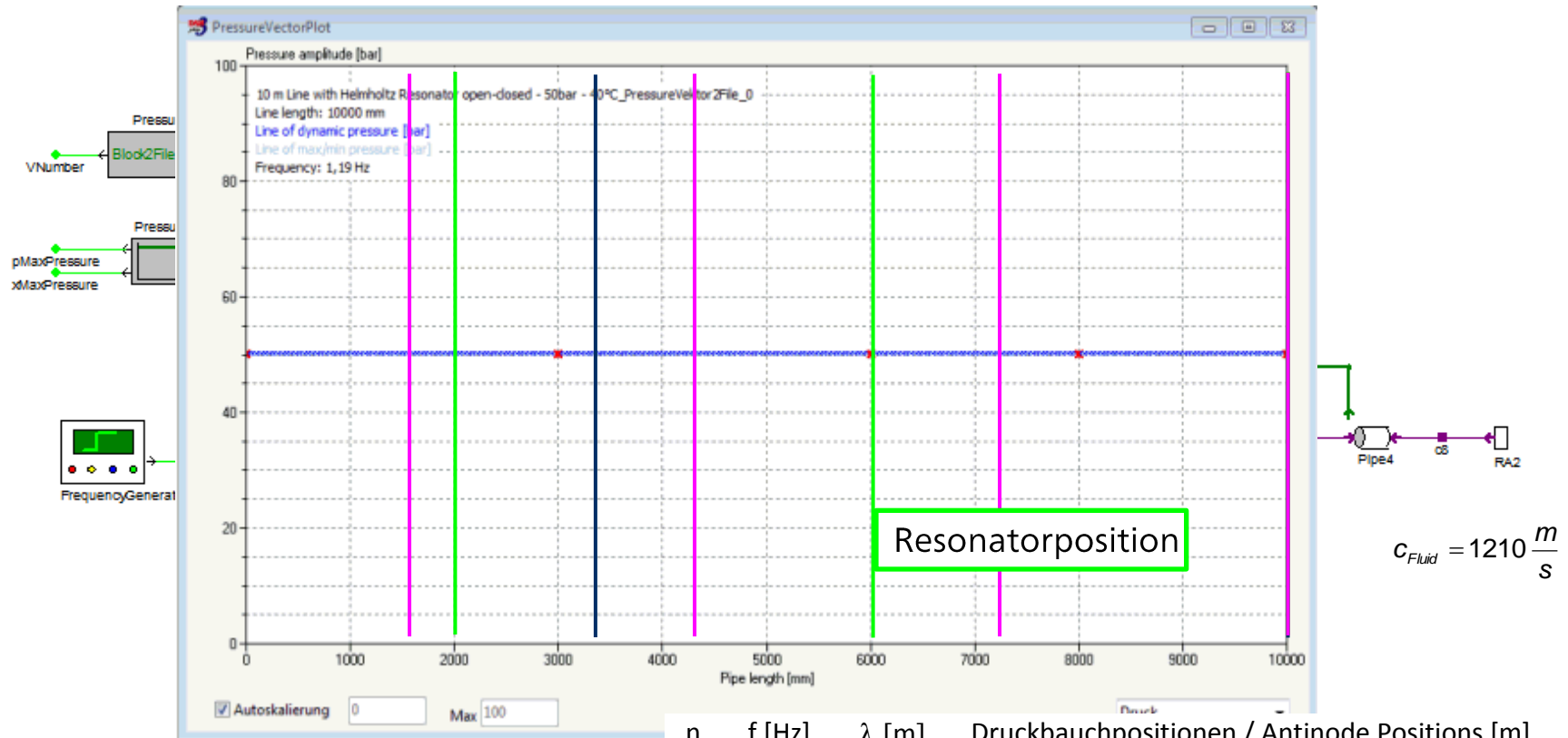
Druckbauchpositionen in einer 10 m Leitung

n	f [Hz]	λ [m]	Druckbauchpositionen / Antinode Positions [m]				
0	30,25	40,00	10,00				
1	90,75	13,33	3,33	10,00			
2	151,25	8,00	2,00	6,00	10,00		
3	211,75	5,71	1,43	4,29	7,14	10,00	
4	272,25	4,44	1,11	3,33	5,56	7,78	10,00

$$x_{\text{Druckbauch}} = \frac{(1+2i)}{(2n+1)} L, \quad i=0,1,2, \dots n$$

Auslegung eines Helmholtz-Resonators

Drucksweepanregung



Antinode Positions in a 10 m pipe

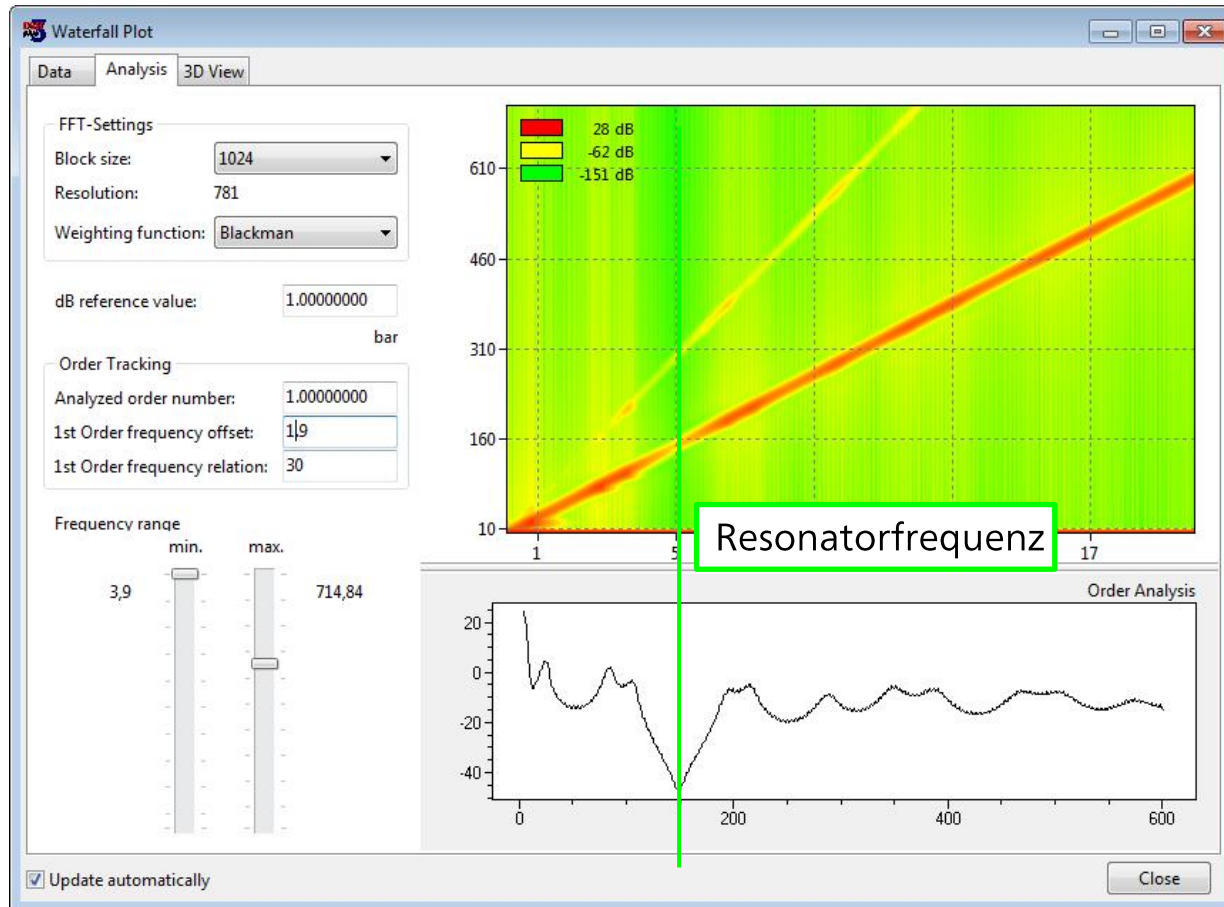
Druckbauchpositionen in einer 10 m Leitung

$$x_{Antinode} = \frac{(1+2i)}{(2n+1)} L, \quad i=0,1,2, \dots n$$

Auslegung eines Helmholtz-Resonators

Analyse mittels Campell-Diagramm

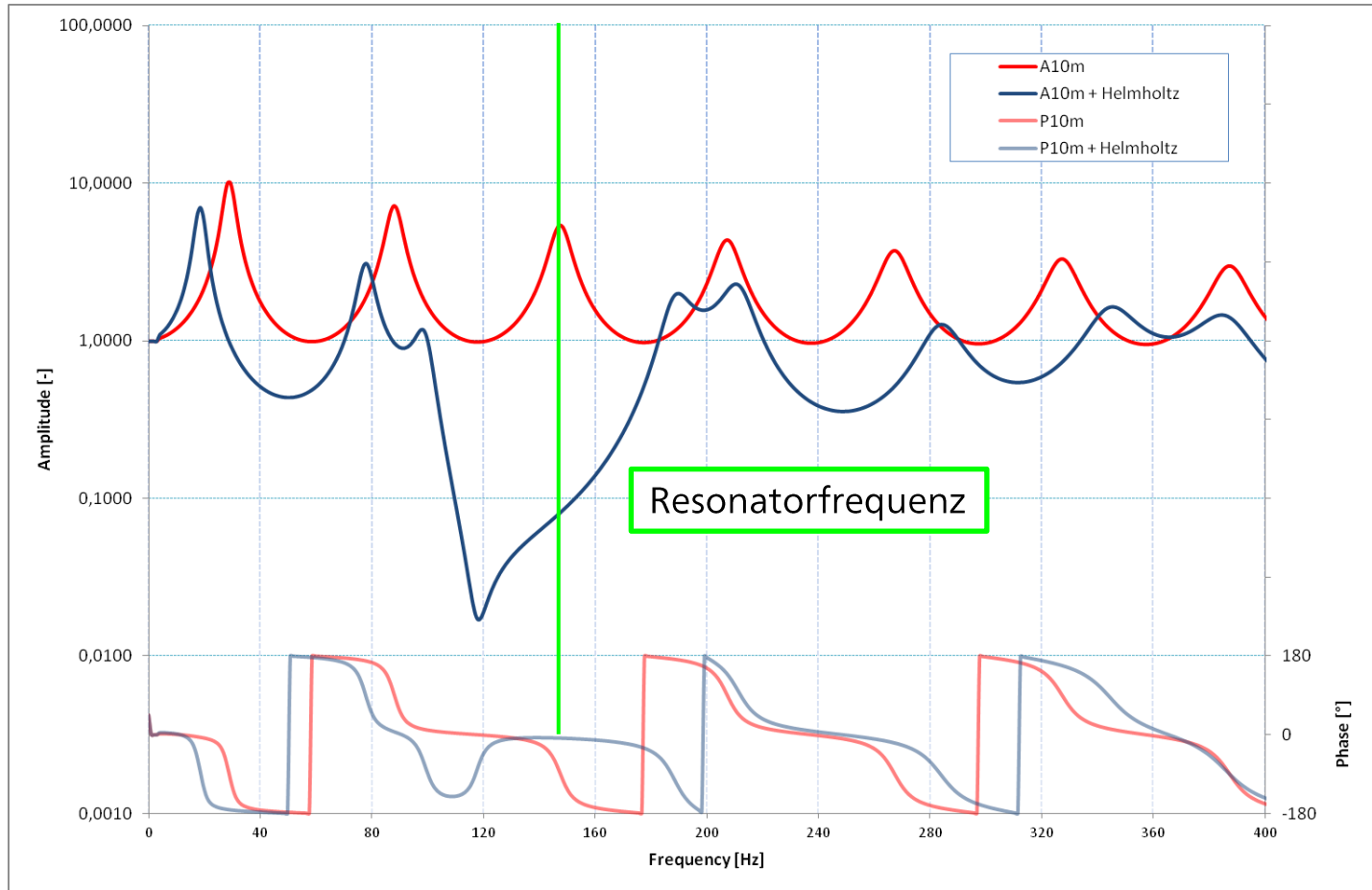
Ordnungsanalyse des Druckes an der Leitungsendposition



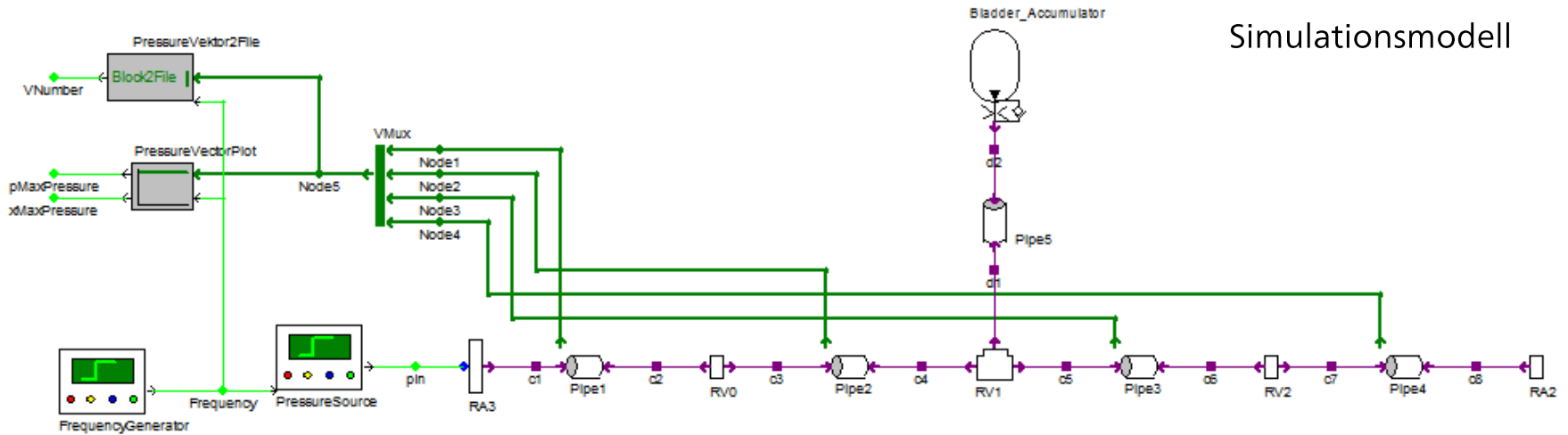
Auslegung eines Helmholtz-Resonators

Analyse mittels Übertragungsfunktion

Übertragungsfunktion einer 10 m Leitung und einer 10 m Leitung mit hydraulischem Helmholtz-Resonator



Auslegung eines Helmholtz-Resonators mit Blasenspeicher



Simulationsmodell

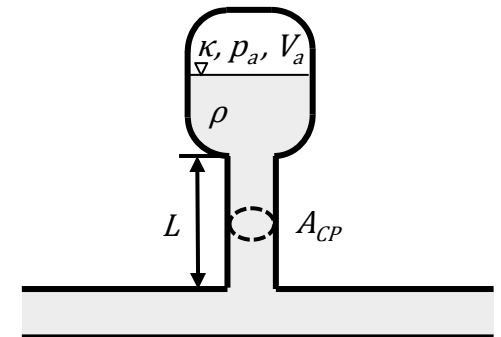
Benötigte Gleichungen

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa p_a A_{CP}}{L \rho V_a}}$$

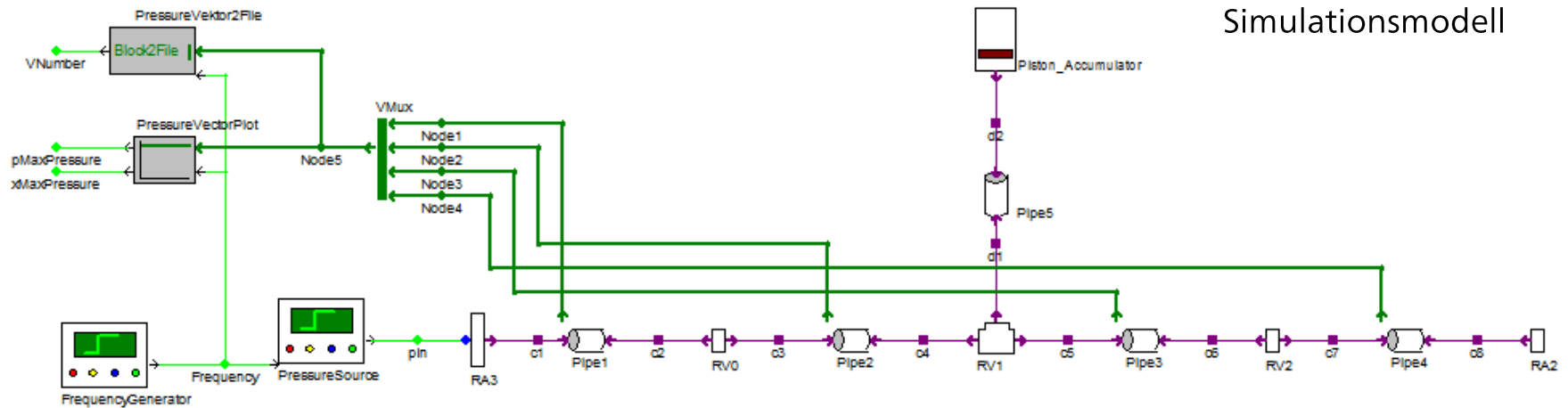
mit:

- κ Polytropenexponent
- p_m mittlerer Gasdruck
- A_L Querschnittsfläche der Zuleitung
- V_m mittleres Gasvolumen des Resonators
- ρ Dichte des Fluids
- L Länge der Zuleitung

Skizze des Resonators



Auslegung eines Helmholtz-Resonators mit Kolbenspeicher



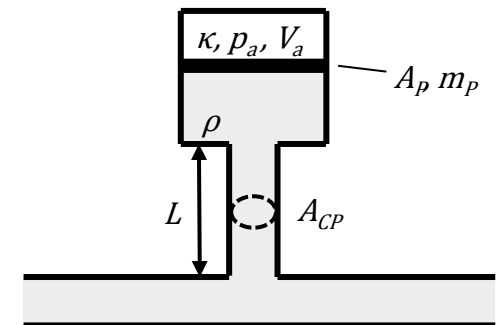
Benötigte Gleichungen

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa p_a}{V_a \left(\frac{\rho L}{A_{CP}} + \frac{m_P}{A_P^2} \right)}}$$

mit:

- κ Polytropenexponent
- p_m mittlerer Gasdruck
- A_L Querschnittsfläche der Zuleitung
- V_m mittleres Gasvolumen des Resonators
- ρ Dichte des Fluids
- L Länge der Zuleitung
- m_K Masse des Kolbens
- A_K Kolbenfläche

Skizze des Resonators



Inhalt

- 1** Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus
- 2** Simulation hydraulischer Leitungssysteme
 - 2.1** Analyse der Druckschwingung
 - 2.2** Übersicht möglicher Dämpfer
 - 2.3** Auslegung eines $\lambda/4$ -Resonators
 - 2.4** Auslegung eines Helmholtz-Resonators
 - 2.5** Messung und Simulation einer Expansionskammer
- 3** Simulation von Dehnschlauchleitungen
- 4** Modellierung der Systemanregung

Messung und Simulation einer Expansionskammer

FLUIDON provisorischer pneumatischer Leitungsprüfstand

Measurement Computer
and Microphone Amplifiers
Messrechner und Mikrofonverstärker

Sub-Woofer as Sound
Source
Sub-Woofer als Geräuschquelle

Test Set-up
and 1^{st.} Microphone
Messaufbau und 1. Mikrophon



Messung und Simulation einer Expansionskammer

FLUIDON provisorischer pneumatischer Leitungsprüfstand

2^{nd.} Microphone
2. Mikrophon

1^{st.} Microphone
1. Mikrophon

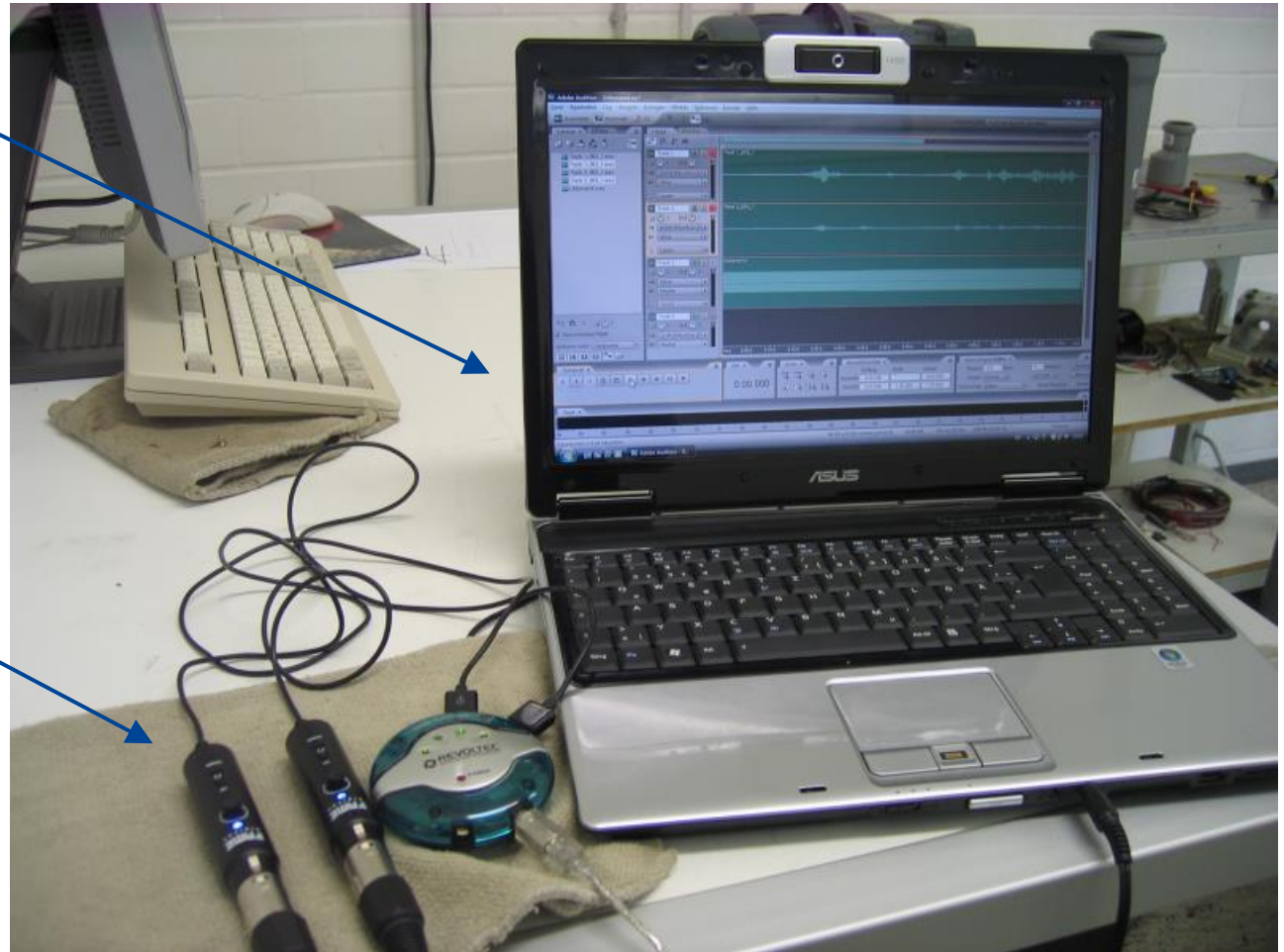


Messung und Simulation einer Expansionskammer

FLUIDON provisorischer pneumatischer Leitungsprüfstand

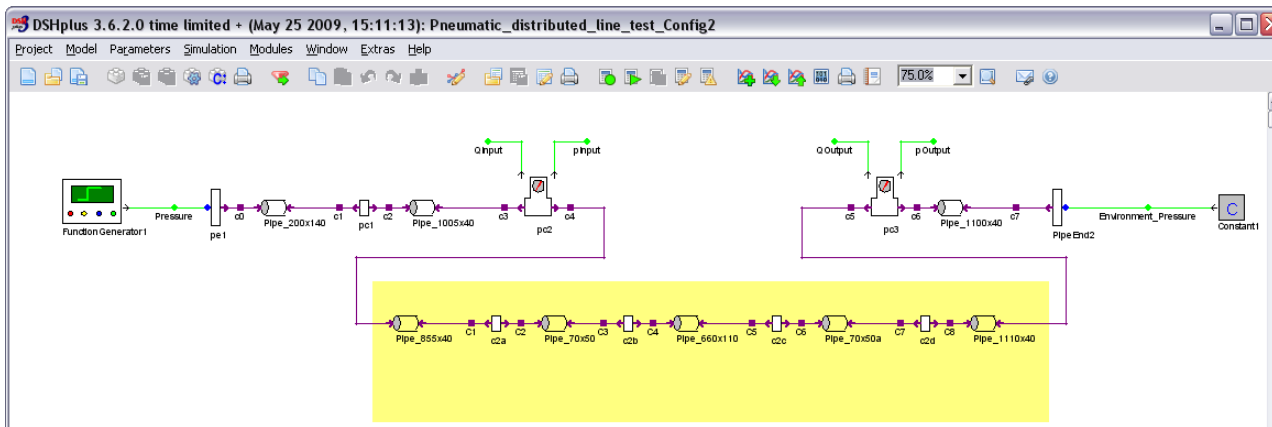
Measurement Computer
with Audio Software
Messrechner mit Audio-Software

USB-Microphone Amplifiers
USB-Mikrofonverstärker



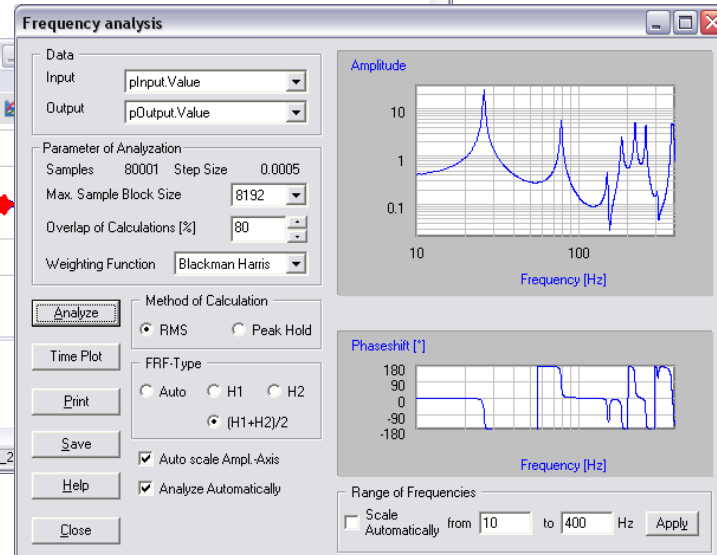
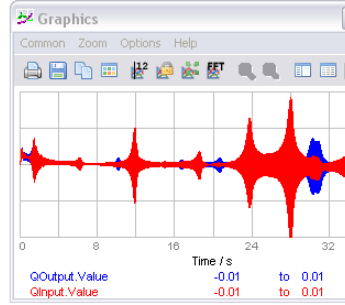
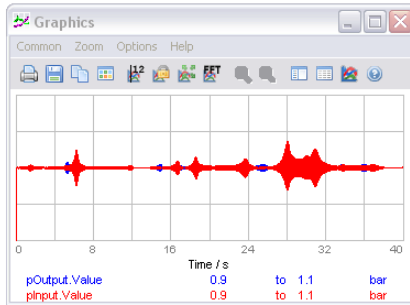
Messung und Simulation einer Expansionskammer

Simulationsmodell der pneumatischen Leitung



Time Domain Simulation
Simulation im Zeitbereich

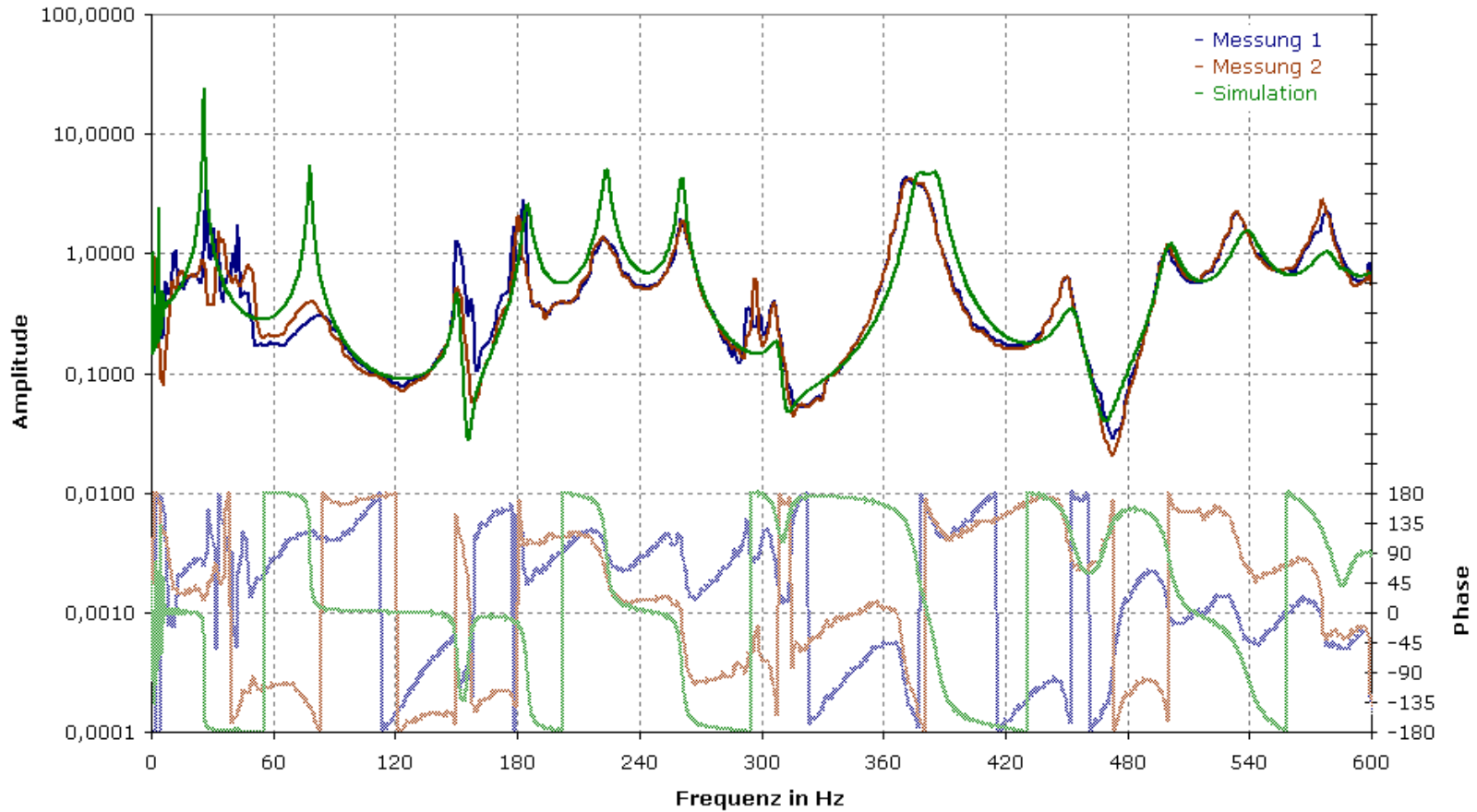
Frequency Response
Frequenzgang



Messung und Simulation einer Expansionskammer

Vergleich von Messung und Simulation

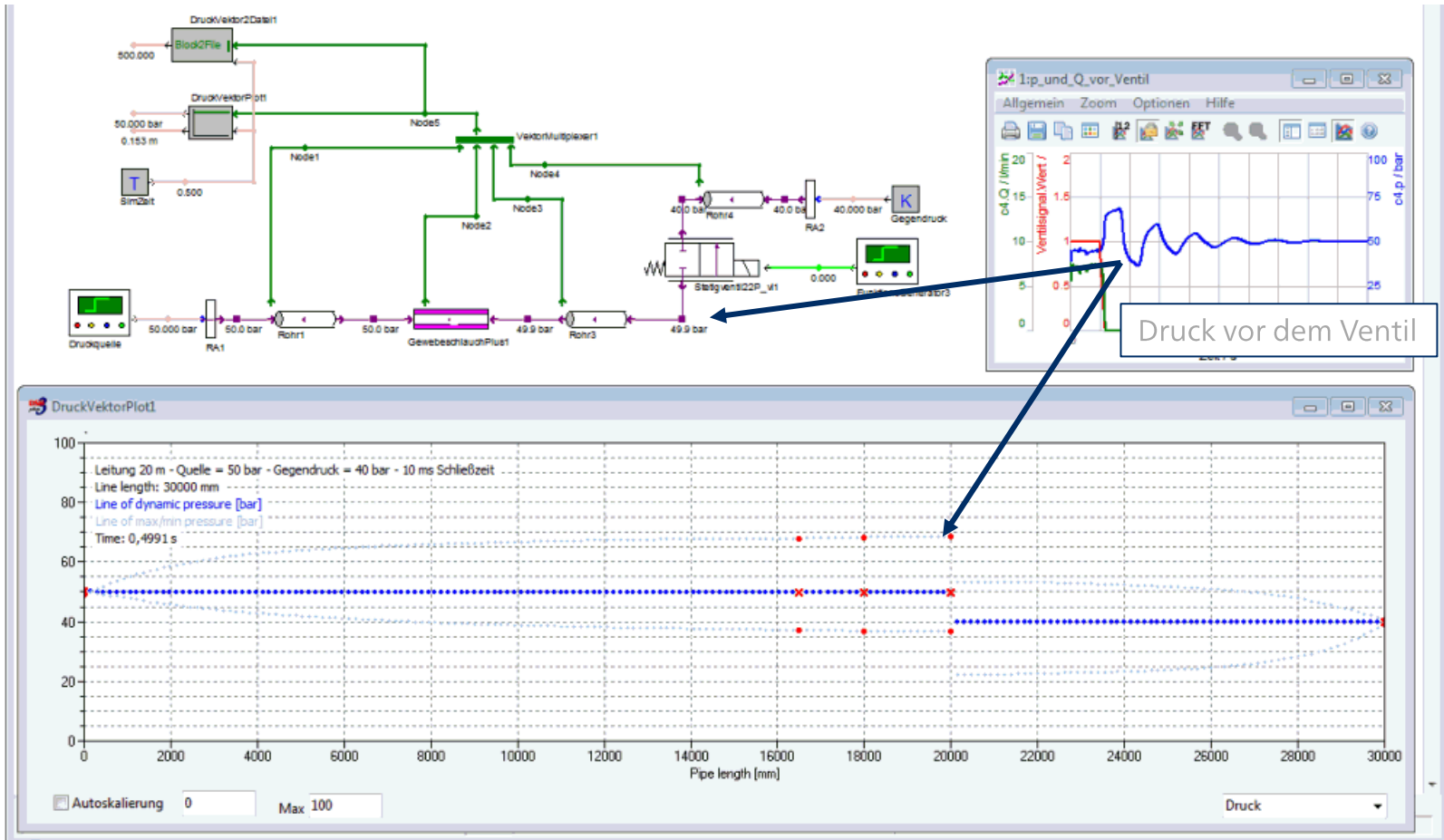
Amplituden- und Phasengang einer Pneumatikleitung



Inhalt

- 1** Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus
- 2** Simulation hydraulischer Leitungssysteme
- 3** Simulation von Dehnschlauchleitungen
 - 3.1** Fallbeispiel 2: Druckstoß mit Schlauchleitung
 - 3.2 Aufbau des Dehnschlauchmodells
 - 3.3 Parameterermittlung aus Messungen
 - 3.4 Simulation einer Automobildehnschlauchleitung
- 4** Modellierung der Systemanregung

Fallbeispiel 2: Druckstoß mit Schlauchleitung

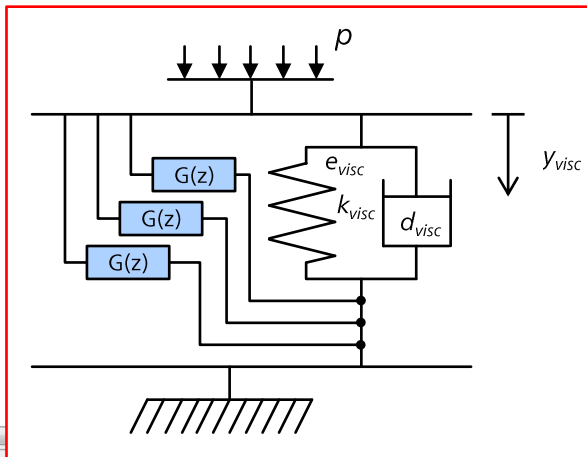
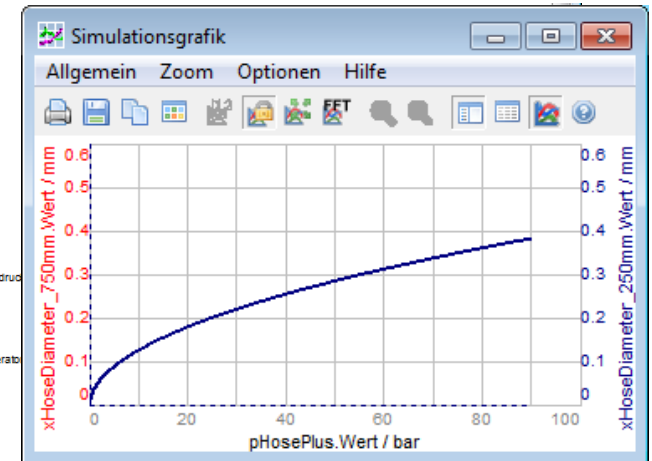
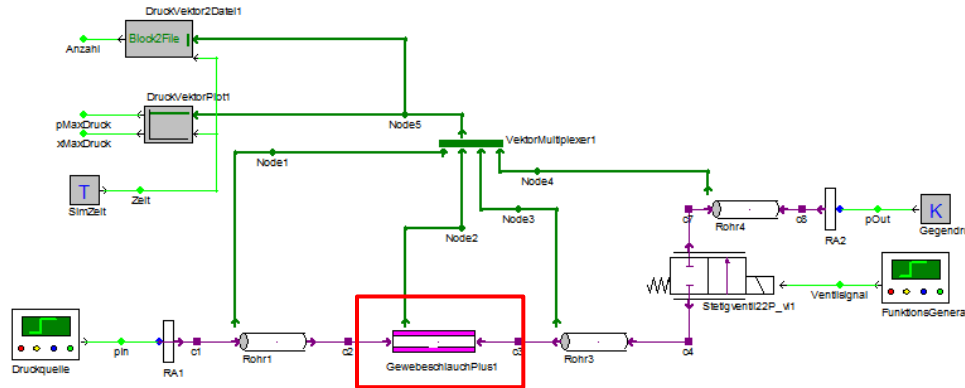


Inhalt

- 1** Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus
- 2** Simulation hydraulischer Leitungssysteme
- 3** Simulation von Dehnschlauchleitungen
 - 3.1** Fallbeispiel 2: Druckstoß mit Schlauchleitung
 - 3.2** Aufbau des Dehnschlauchmodells
 - 3.3 Parameterermittlung aus Messungen
 - 3.4 Simulation einer Automobildehnschlauchleitung
- 4** Modellierung der Systemanregung

Aufbau des Dehnschlauchmodells

Neuerungen zu Rohr- und Schlauchleitungen in DSHplus

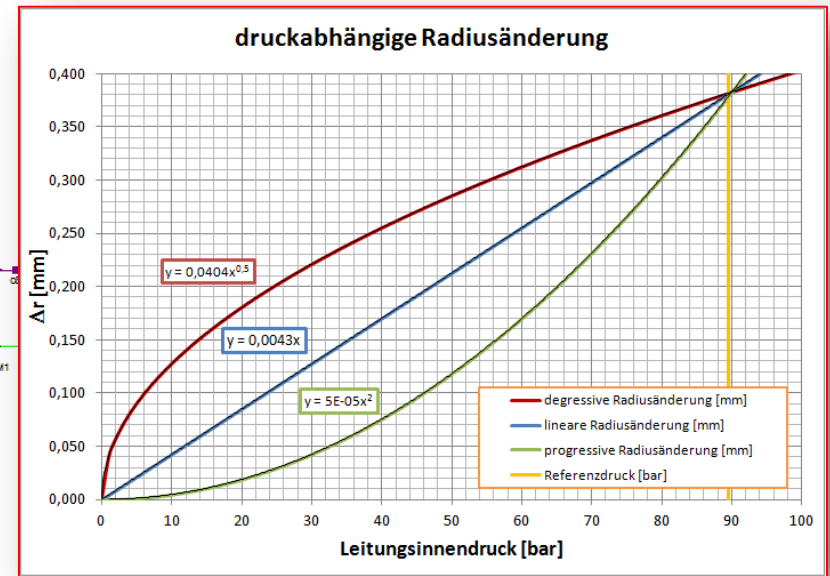
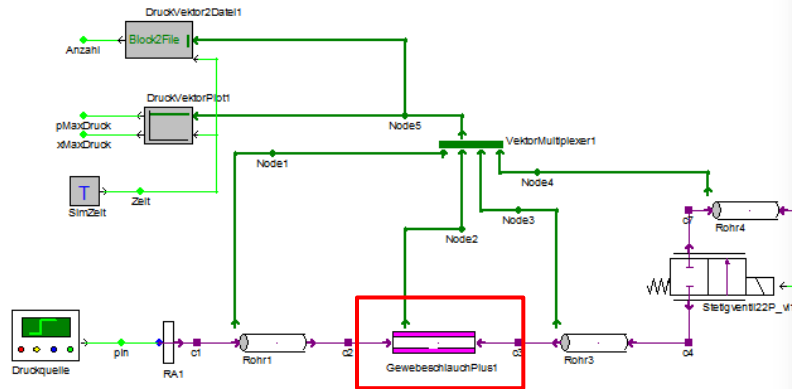


Rohr- und Schlauchleitungen „Plus“ verfügen über ein visko-elastisches Feder-Dämpfer-Ersatzmodell mit Gewebeeigenschwungsanteil für die Materialdämpfung der Wandung.

Leitung 18,5 m - Schlauch 1,5 m - Quelle = 50 bar - Gegendruck = 40 bar - 10 ms Schließzeit

Aufbau des Dehnschlauchmodells

Parameter der visko-elastischen Dämpfung



Viskoelastische Schlauchwandberechnung

viskoelastische Materialsteifigkeit bar/m

viskoelastischer Materialsteifigkeitsexponent ...

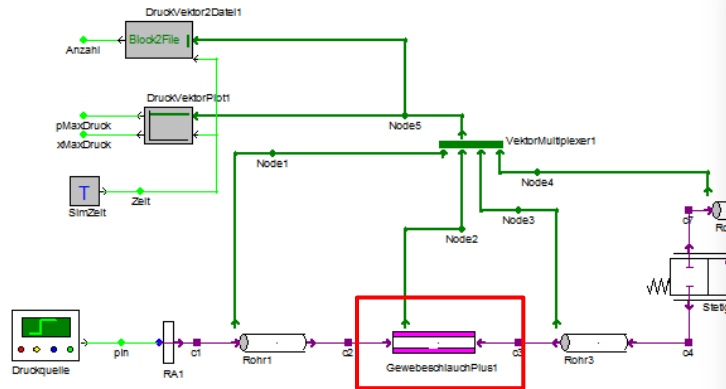
viskoelastische Gewebedämpfung bars/m

Die visko-elastische Federsteifigkeit kann über einen Exponenten auch degressives oder progressives Materialverhalten abbilden.

Leitung 18,5 m - Schlauch 1,5 m - Quelle = 50 bar - Gegendruck = 40 bar - 10 ms Schließzeit

Aufbau des Dehnschlauchmodells

Parameter der Gewebeeigenschwingung



Die ersten drei Ordnungen der Gewebeeigenschwingung werden über ein schwingungsfähiges Ersatzmodell empirisch abgebildet.

Gewebeparameter		
Frequenz	0	Hz
Exponent	-0.891	...
Basiswert	200.25	...
Frequenzfaktor 1. Ordnung	1	...
Dämpfung 1. Ordnung	0.07	...
Verstärkung 1. Ordnung	0.00032	mm/bar
Frequenzfaktor 2. Ordnung	2	...
Dämpfung 2. Ordnung	0.09	...
Verstärkung 2. Ordnung	0.00025	mm/bar
Frequenzfaktor 3. Ordnung	3	...
Dämpfung 3. Ordnung	0.09	...
Verstärkung 3. Ordnung	5E-5	mm/bar

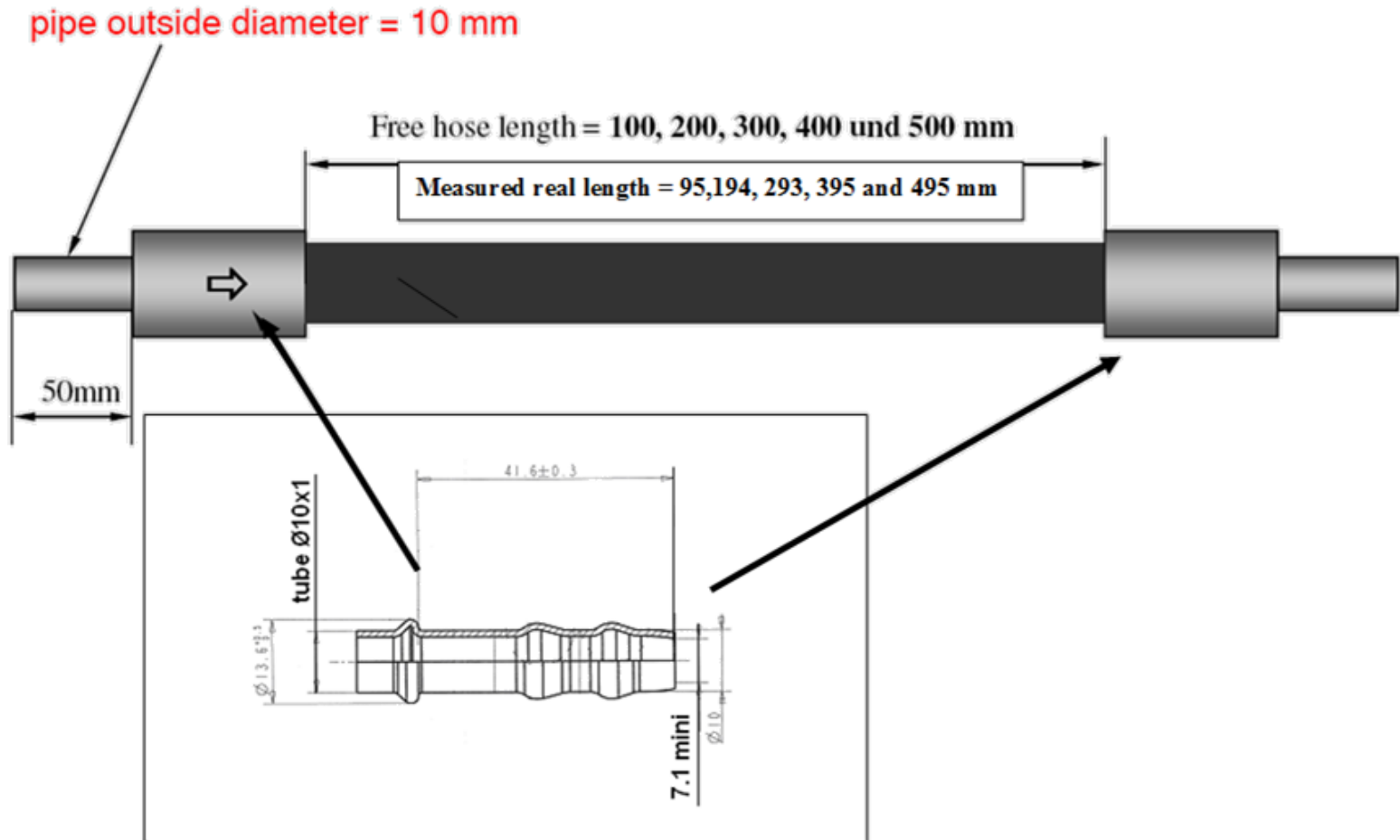
Leitung 18,5 m - Schlauch 1,5 m - Quelle = 50 bar - Gegendruck = 40 bar - 10 ms Schließzeit

Inhalt

- 1** Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus
- 2** Simulation hydraulischer Leitungssysteme
- 3** Simulation von Dehnschlauchleitungen
 - 3.1** Fallbeispiel 2: Druckstoß mit Schlauchleitung
 - 3.2** Aufbau des Dehnschlauchmodells
 - 3.3** Parameterermittlung aus Messungen
 - 3.4 Simulation einer Automobilehnschlauchleitung
- 4** Modellierung der Systemanregung

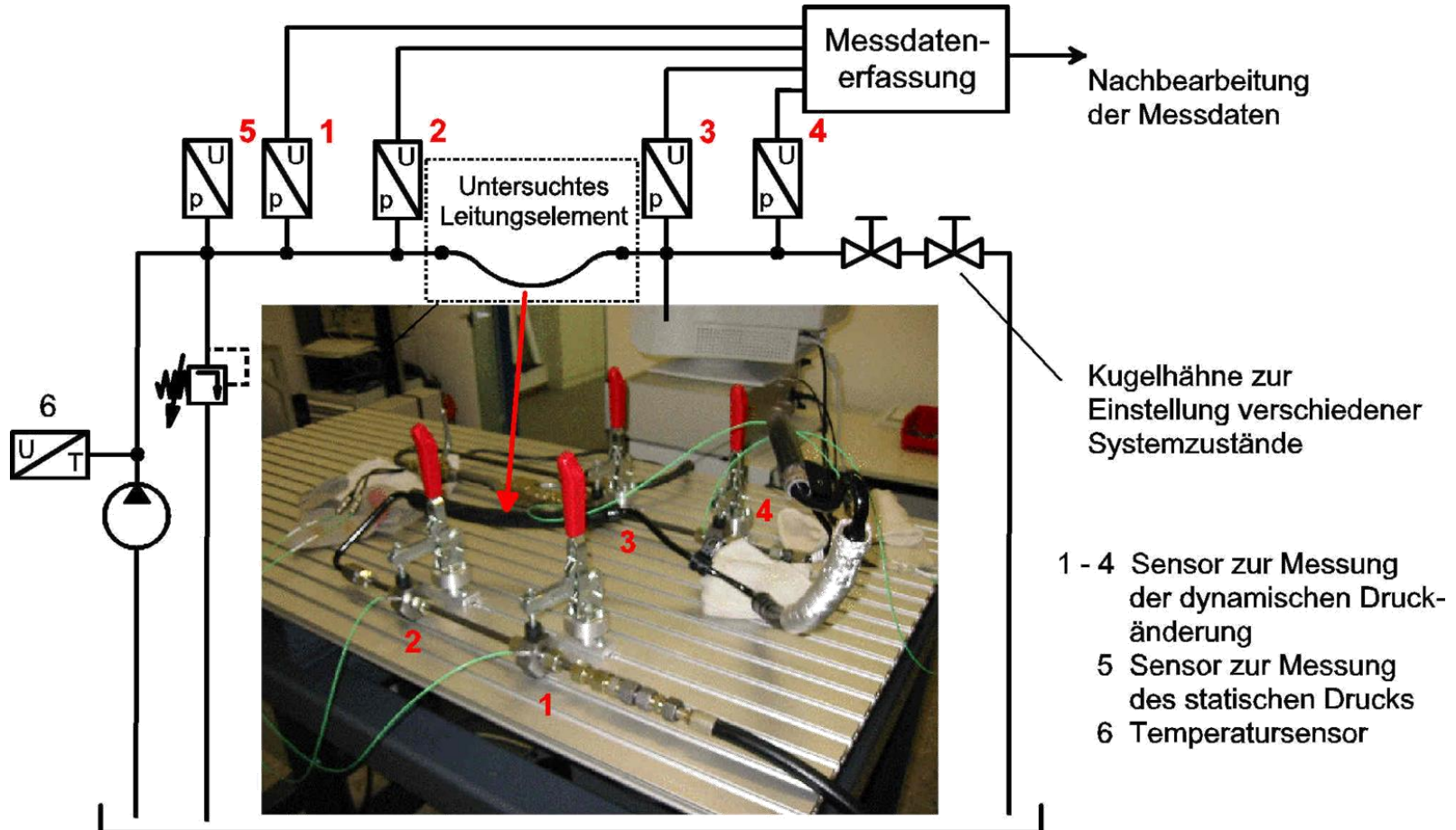
Parameterermittlung aus Messungen

Hose HPDA1-CM-CM-11-347-11 – Geometriedaten der Dehnschlauchleitung



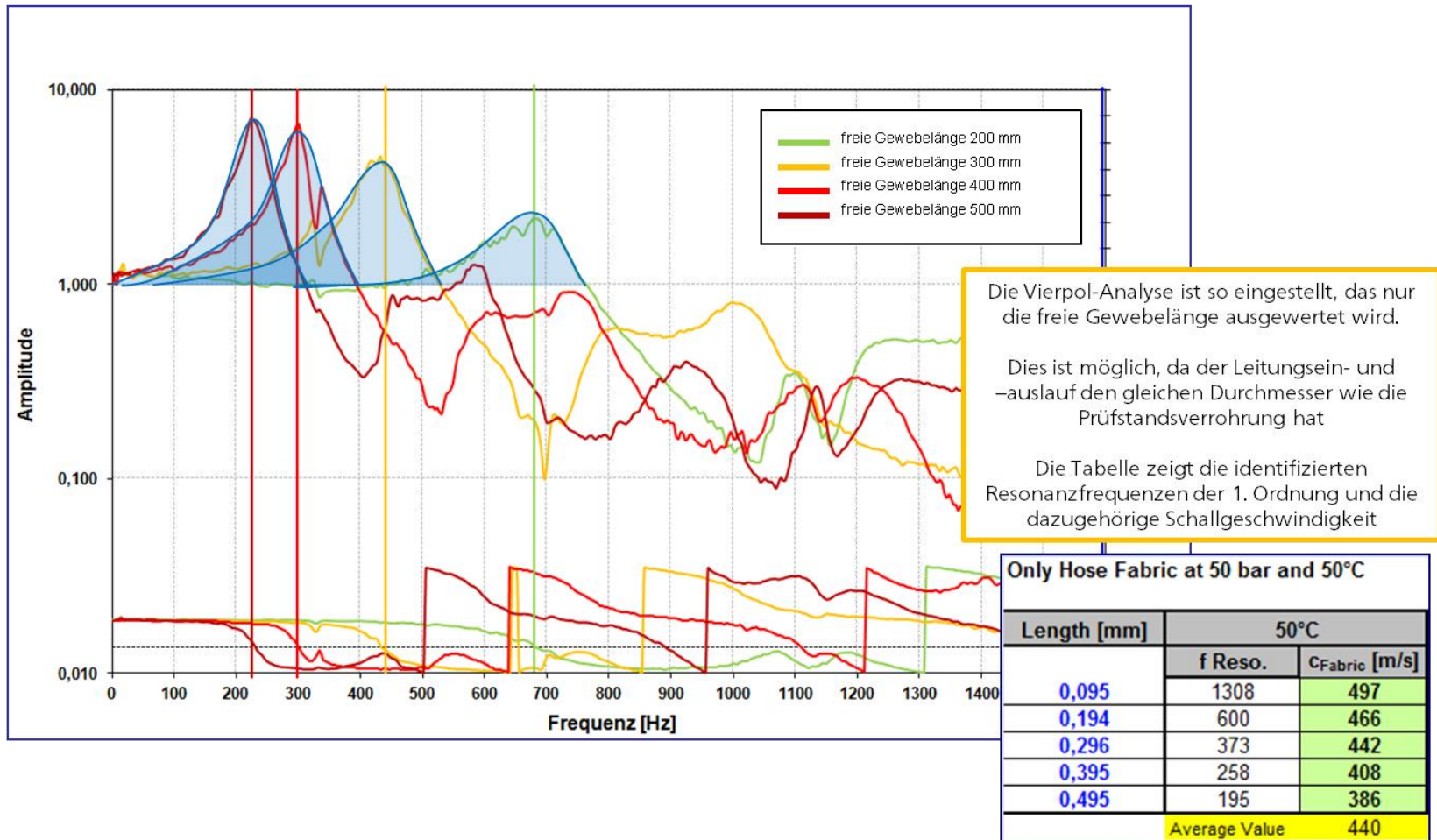
Parameterermittlung aus Messungen

Leitungsprüfstand



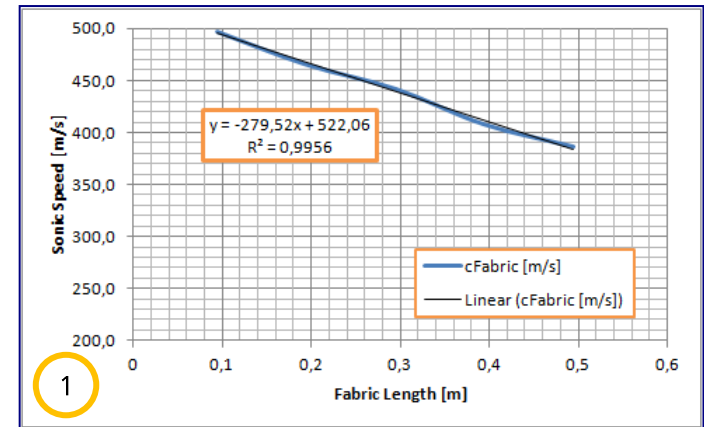
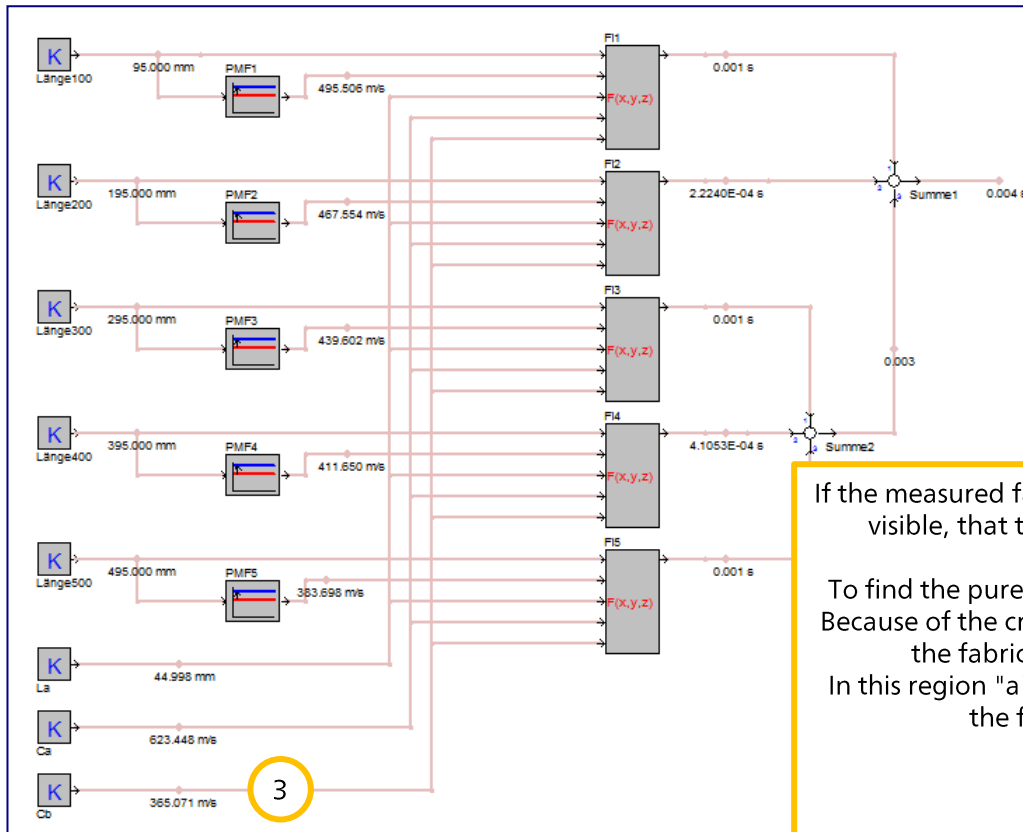
Parameterermittlung aus Messungen

Schritt 1: Analyse der 1. Leitungsresonanz – 50 bar, 50 °C



Parameterermittlung aus Messungen

Schritt 2: Iterative Schallgeschwindigkeitsbestimmung



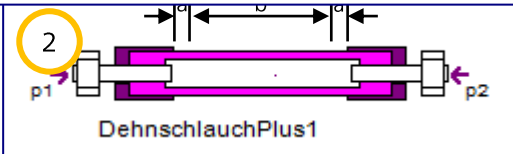
If the measured fabric's sonic speed table is graphically represented it becomes visible, that the sonic speed linear decreases with the fabric length (1).

To find the pure sonic speed of the fabric, the following assumption is made: Because of the crimping of the hose there will be a region "a" on both sides of the fabric, where the sonic speed is influenced by the crimping. In this region "a" the sonic speed will be higher than in the region "b", where the fabric's sonic speed can develop uninfluenced (2).

The assumption can be expressed, as:

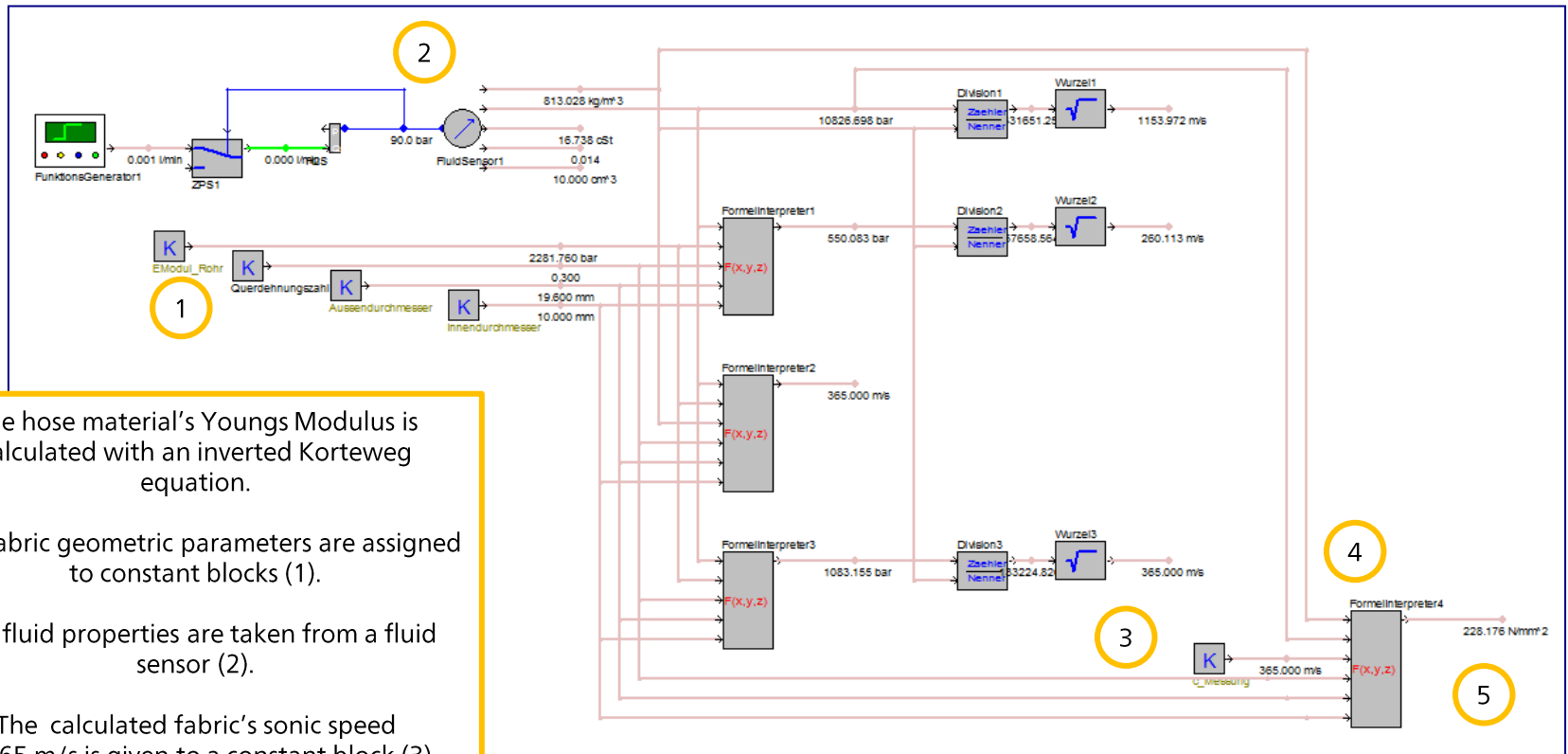
$$\frac{2a + b}{c_{Measured}} = \frac{2a}{c_{Crimping}} + \frac{b}{c_{Fabric}}$$

The values for a, $c_{Crimping}$, and c_{Fabric} now can be calculation by means of an automatic parameter optimization. (3)



Parameterermittlung aus Messungen

Schritt 3: Berechnung des Material E-Moduls



The hose material's Youngs Modulus is calculated with an inverted Korteweg equation.

The fabric geometric parameters are assigned to constant blocks (1).

The fluid properties are taken from a fluid sensor (2).

The calculated fabric's sonic speed of 365 m/s is given to a constant block (3).

The equation interpreter contains the inverted Korteweg equation (4).

The hose material's Youngs modulus is 228 N/mm² (5).

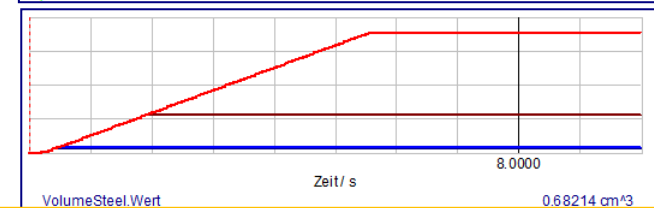
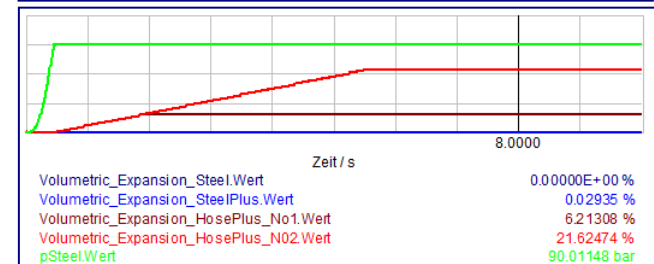
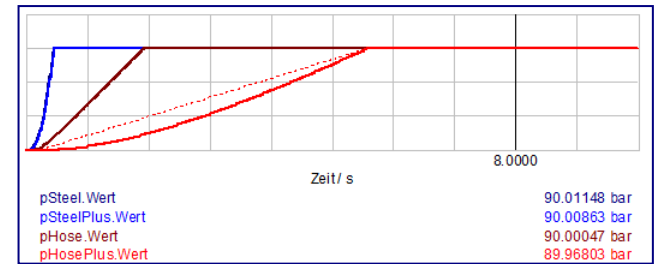
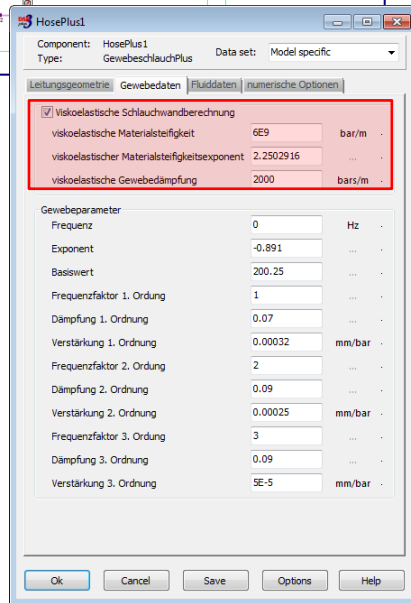
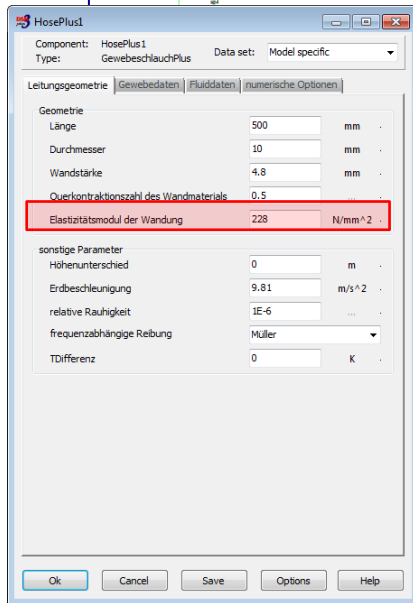
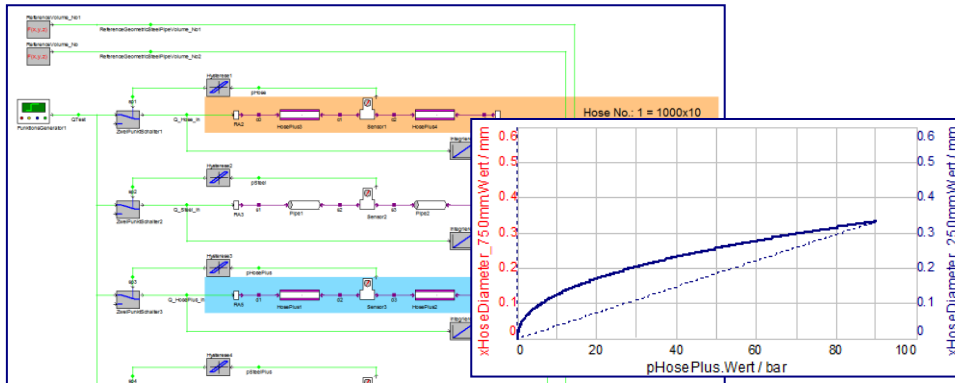
Korteweg equation (here for the pipe longitudinally fixed):

$$c_i = \sqrt{\frac{K}{\rho} \left[1 + (1 - \nu^2) \frac{KD_i}{E_i e_i} \right]^{-1}} \quad 11$$

where: K - liquid bulk modulus, E - Young's modulus of pipe elasticity, D - pipe diameter, e - pipe wall thickness, ν - contraction coefficient (Poisson ratio) of the pipe material.

Parameterermittlung aus Messungen

Schritt 4: Test der visko-elastischen Materialparameter



The Young's Modulus is set to 228N/mm²

Visco-elastic material stiffness: 614045888 bar/m

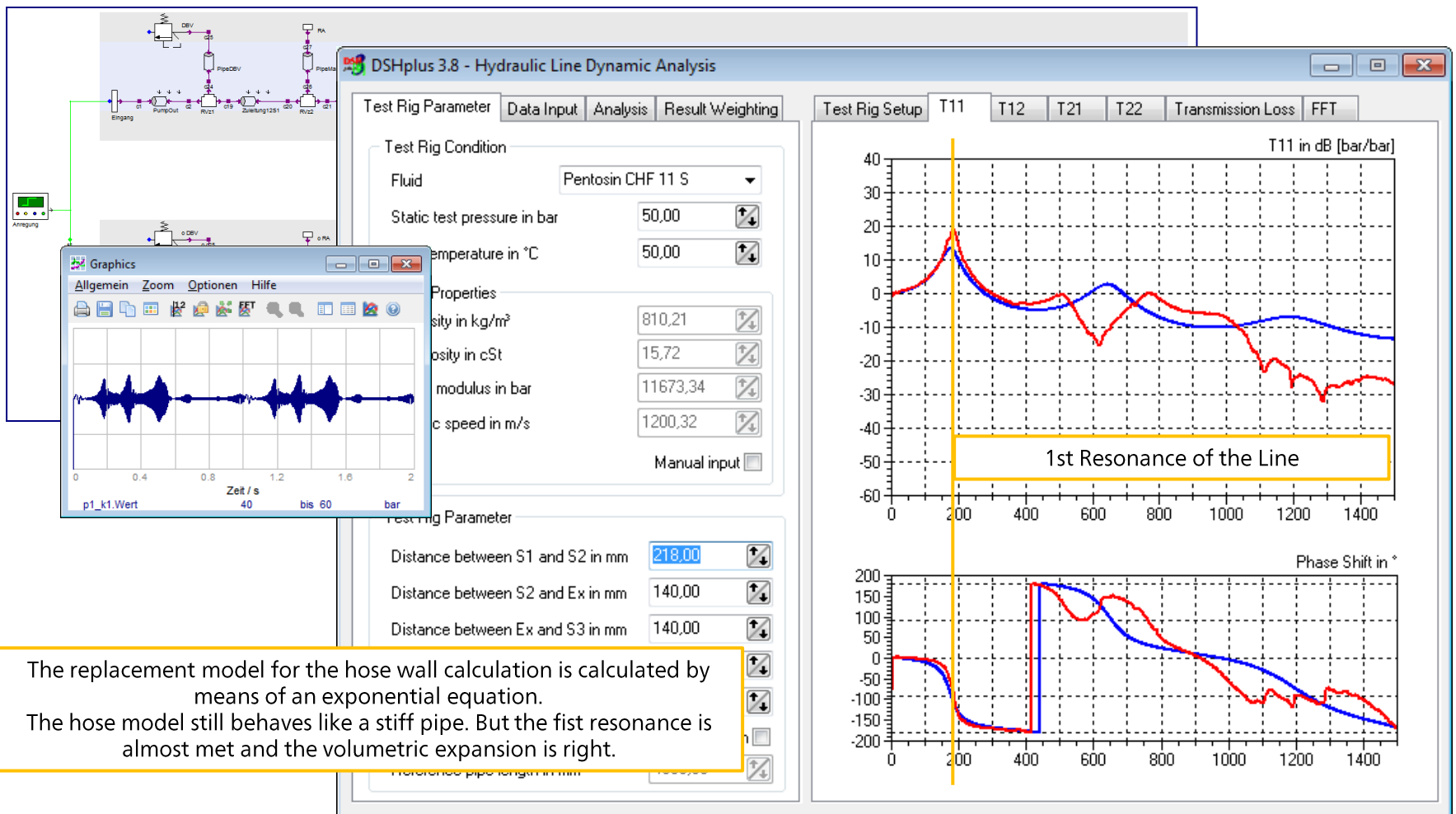
Visco-elastic material stiffness exponent : 2

Visco-elastic material damping: 2000 bar s/m.

The volumetric expansion at 90 bar is about 17,81 cm³ (21,62 %).

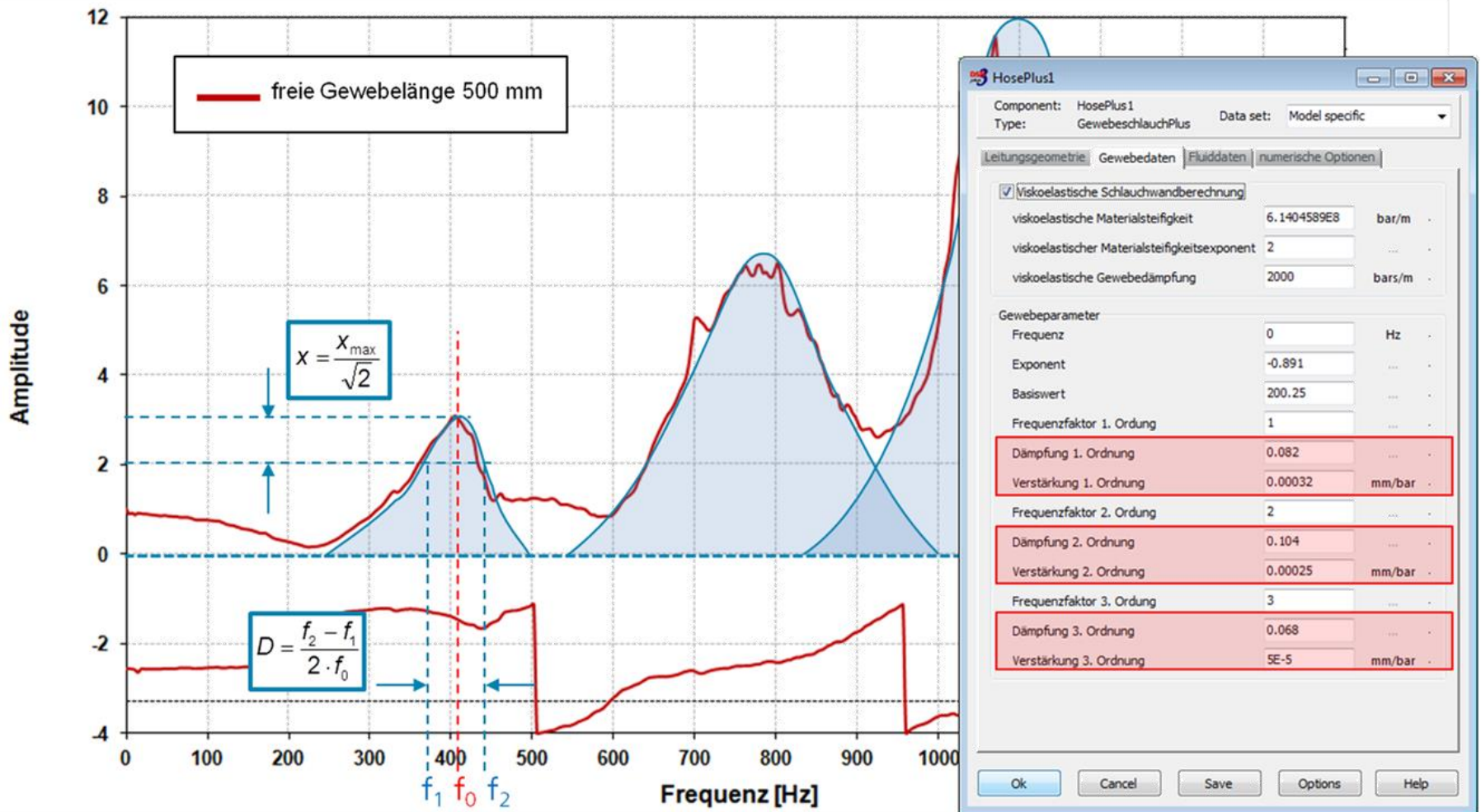
Parameterermittlung aus Messungen

Schritt 5: Testsimulation mit den visko-elastischen Materialparameter



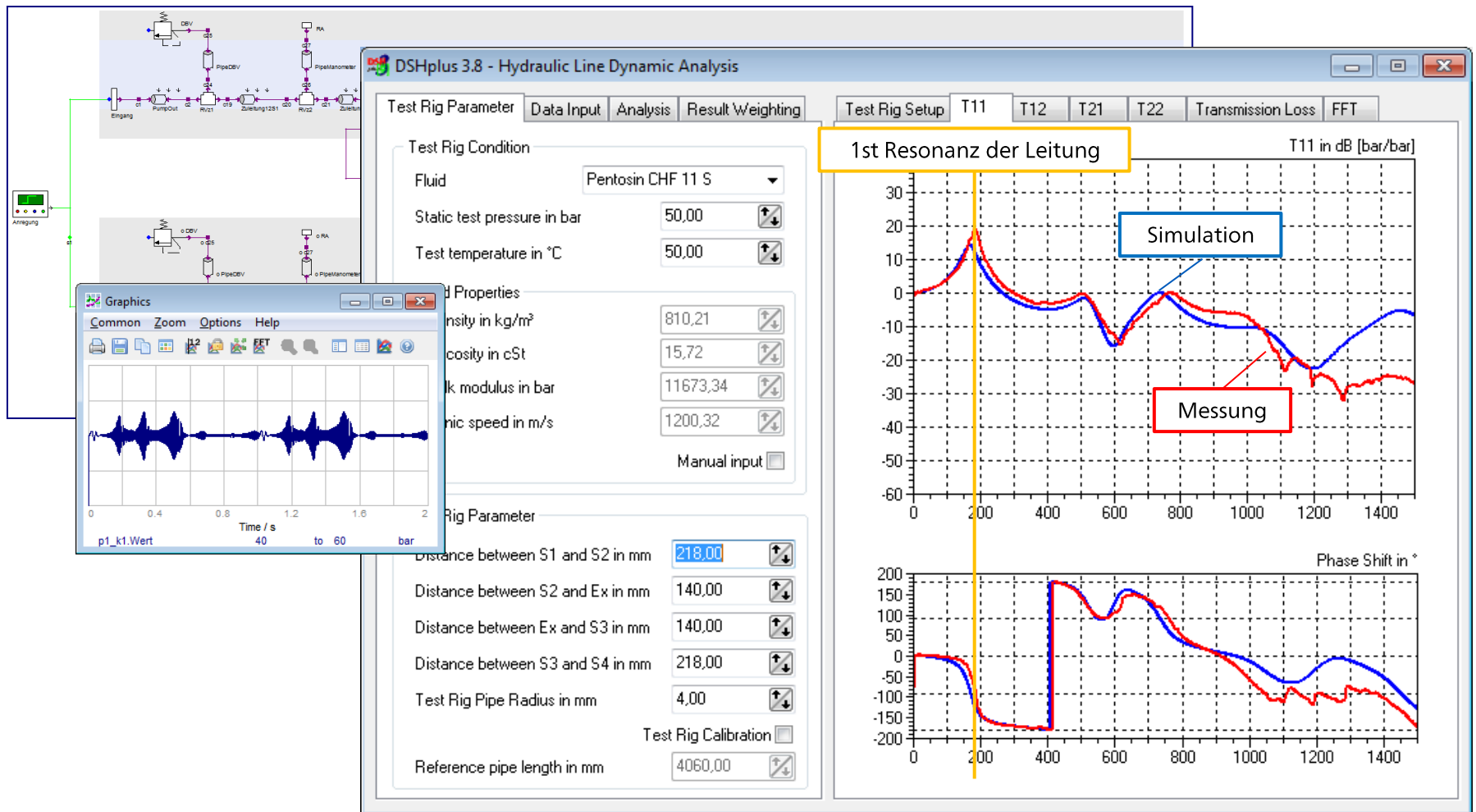
Parameterermittlung aus Messungen

Schritt 6: Analyse der Gewebeeigenschwingung – Methode der halben Bandbreite



Parameterermittlung aus Messungen

Schritt 8: Simulation der Dehnschlauchleitung



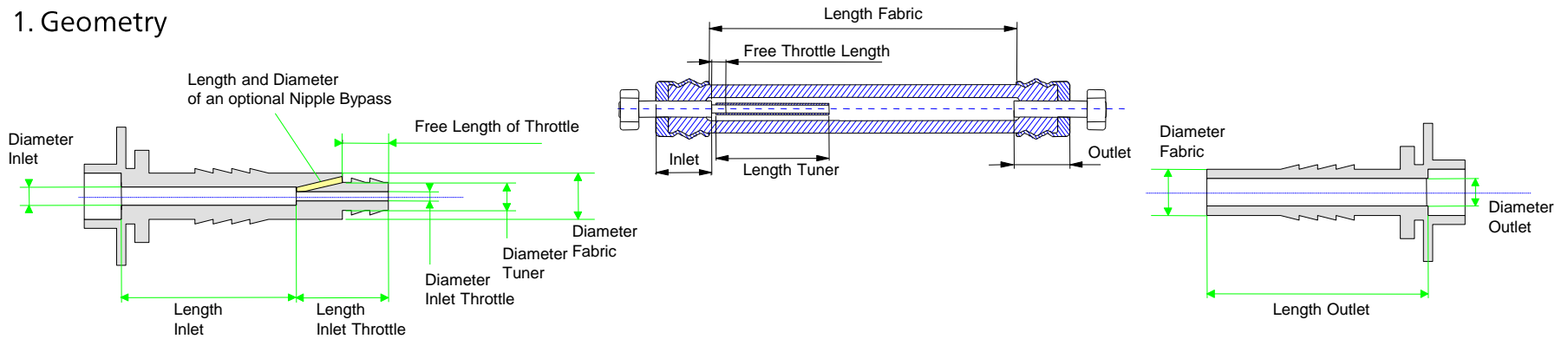
Inhalt

- 1** Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus
- 2** Simulation hydraulischer Leitungssysteme
- 3** Simulation von Dehnschlauchleitungen
 - 3.1** Fallbeispiel 2: Druckstoß mit Schlauchleitung
 - 3.2** Aufbau des Dehnschlauchmodells
 - 3.3** Parameterermittlung aus Messungen
 - 3.4** Simulation einer Automobildehnschlauchleitung
- 4** Modellierung der Systemanregung

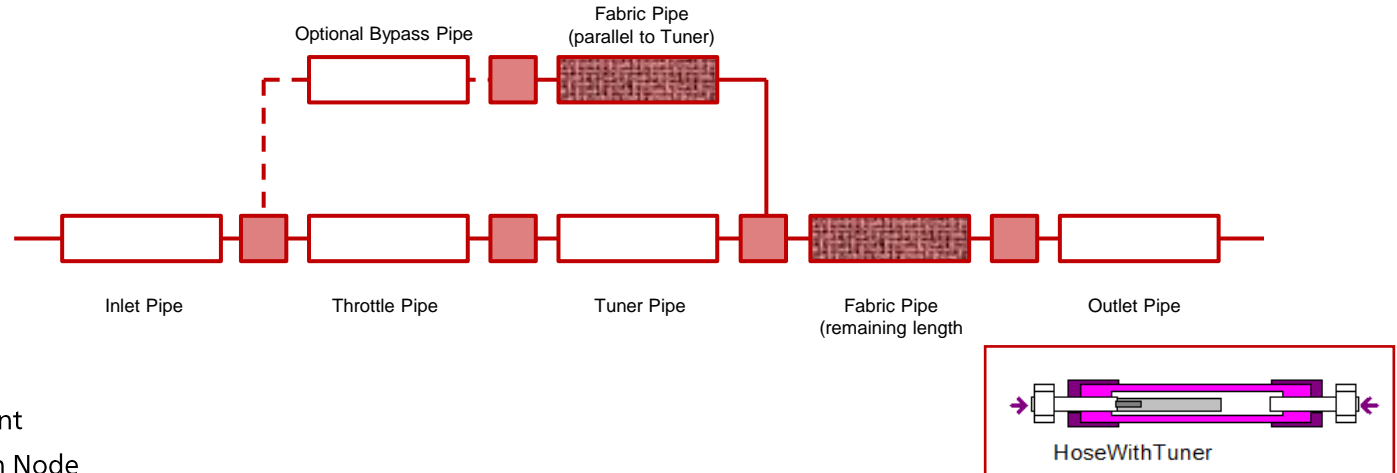
Simulation einer Automobiledehnschlauchleitung

Aufbau von Dehnschlauchleitungen – PA-Tunerleitung

1. Geometry



2. Model Structure



Simulation einer Automobildrehanschlauchleitung

Übersicht verfügbarer Bauteile – Simulationsmodell einer 2-Kammerdrehanschlauchleitung

The image displays the FLUIDON simulation environment for a 2-chamber hose assembly. The main window shows a detailed schematic of the hose with various components like pumps, valves, and sensors. A central inset shows a 3D model of the hose assembly with a red arrow pointing to a specific component in the main schematic.

Fluid options dialog:

- Fluid name: Pentosin CHF 11 S
- Start temperature of the system in °C: 50
- Pressure in bar: 0
- Viscosity in mm²/s: 14.6
- E-Oil in bar: 11034.9
- Base density in kg/m³: 806.6
- Heat capacity in J/kgK: 2180.5
- Volume extension coefficient in 1/K: 0.000825
- Environment temperature of the system in °C: 20

Leitungsprüfstand dialog (Parameter: Versuch 50 bar, 60 °C):

- gearPump2: gearPump1
- Zahnezahl1: 11
- Zahnezahl2: 11
- Zahnbreite: 8 mm
- Modul: 3
- Profilversebung_x1: 0 mm
- Profilversebung_x2: 0 mm
- Flankenwinkel: 20 °
- Kopfspiel1: 0.6 mm
- Kopfspiel2: 0.6 mm
- Integrierer1: Integrierer1
- ZweiFl: ZweiFl
- gearPump1: gearPump1
- Zahnezahl1: 11
- Zahnezahl2: 11
- Zahnbreite: 8 mm
- Modul: 3
- Profilversebung_x1: 0 mm
- Profilversebung_x2: 0 mm

Pressure at Line Inlet graph:

- Y-axis: p2_K1 Wert /
- X-axis: Zeit / s
- Range: -10 to 10
- Time range: 0 to 0.5 s

Pressur at Line Outlet graph:

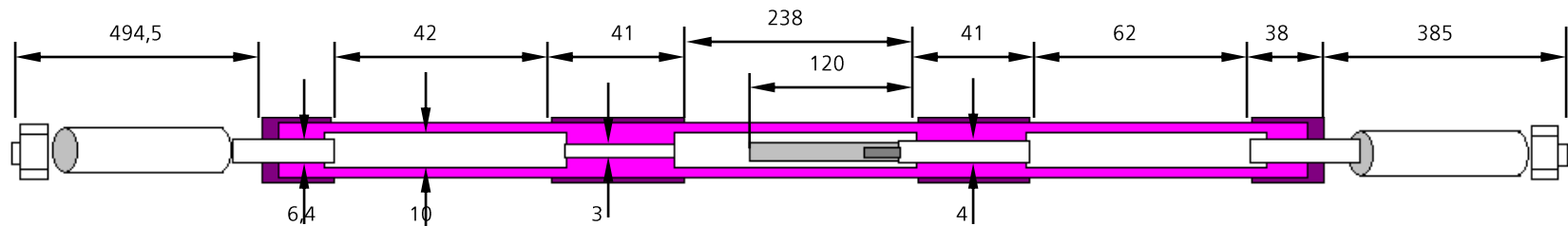
- Y-axis: p3_K1 Wert
- X-axis: Zeit / s
- Range: -10 bis 10
- Time range: 0 to 0.6 s

Component List (Right Panel):

- Hydraulik: SchlauchVerteilParam, SchlauchTunerVerteilParam, SchlauchTunerBohrungVerteilParam, SchlauchTunerBohrungVerteilParam rev2, SchlauchTunerBohrungVerteilParam rev3, SchlauchHelmholtzVerteilParam, SchlauchHelmholtzVerteilParam rev2, SchlauchHelmholtzVerteilParam rev3, SchlauchHelmholtzTunerVerteilParam, SchlauchHelmholtzTunerVerteilParam rev2
- Pneumatik: (empty)
- Mechanik: (empty)
- Regelung: (empty)
- Thermohydraulik: (empty)
- Sonstiges: (empty)
- Module: (empty)
- Extra-Bibs: (empty)
- Auswahl: (empty)

Simulation einer Automobildrehnschlauchleitung

Beispiel für eine Robustheitsanalyse der Stahlröhreleitung



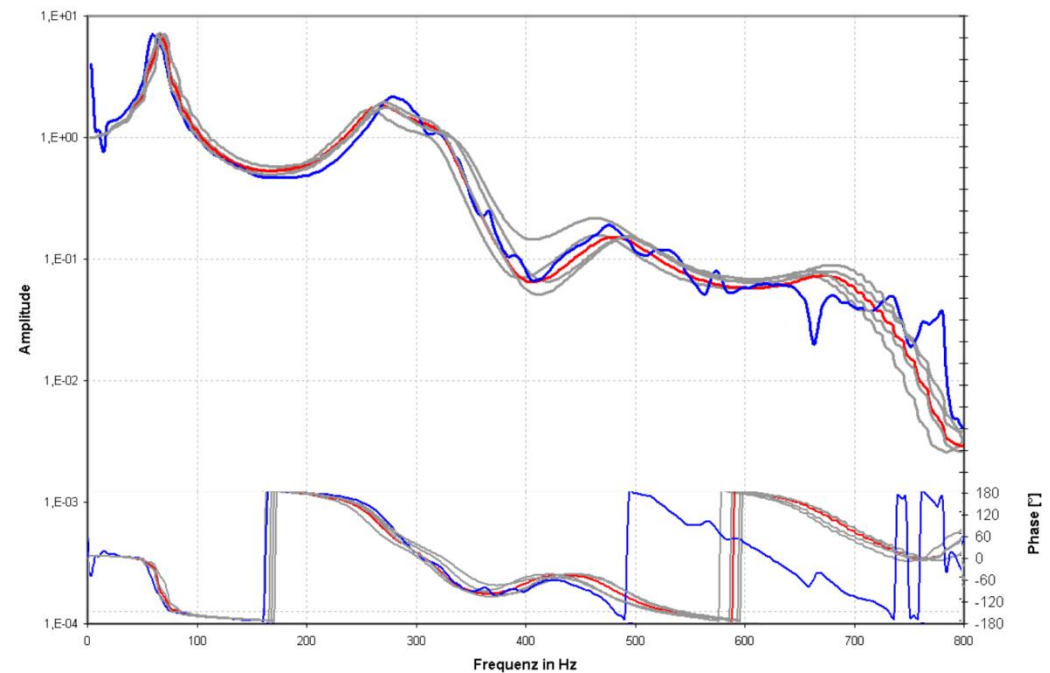
T11 represents the transfer function of pressure input (pump side) to pressure output (steering gear side)

Blue: Measured transfer function

Red: Simulation with exact geometrical values

Grey: Simulation with tolerated geometrical values

T11

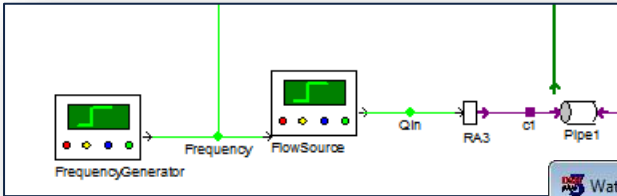


Inhalt

- 1** Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus
- 2** Simulation hydraulischer Leitungssysteme
- 3** Simulation von Dehnschlauchleitungen
- 4** Modellierung der Systemanregung
 - 4.1** Anregung über einen Druck- oder Volumenstromsweep
 - 4.2 Anregung mit geometrischem Pumpenmodell
 - 4.3 Anregung mit gemessener Pumpe

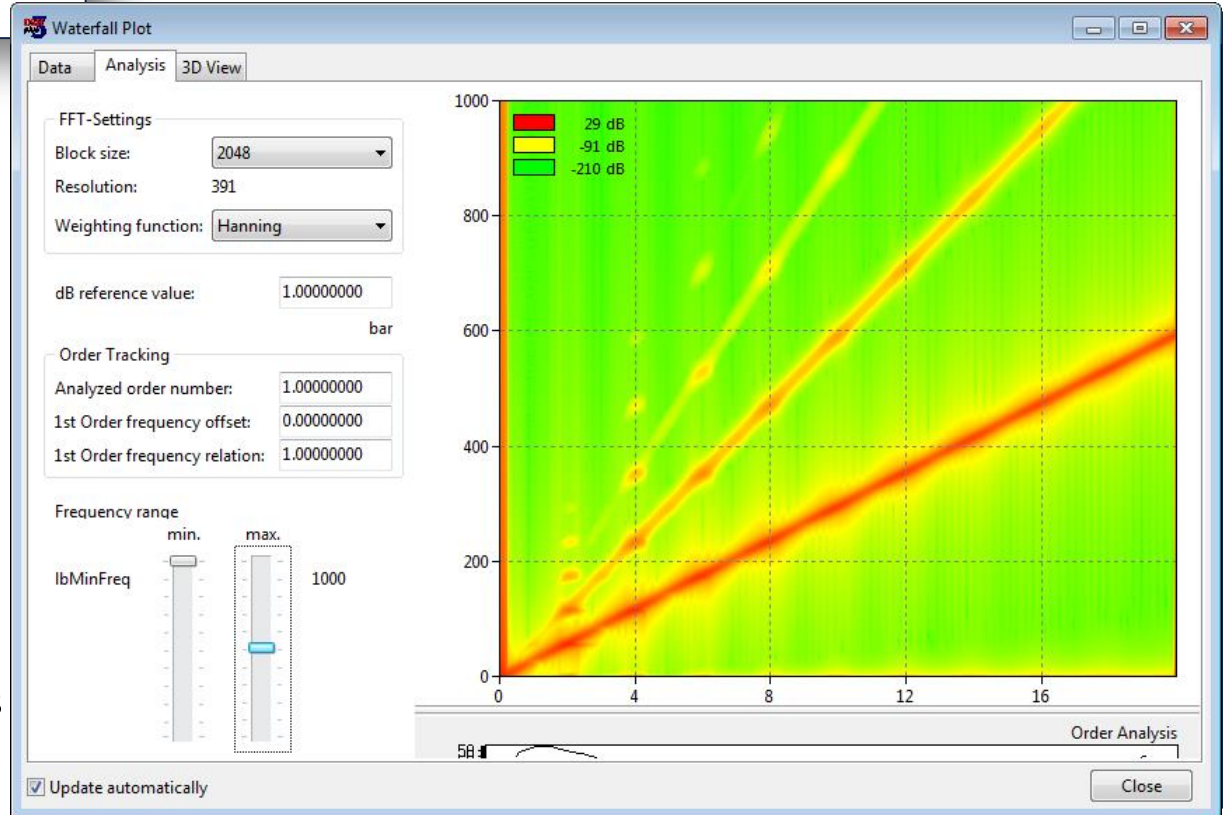
Einfache Anregung über einen Sinus-Sweep

Volumenstromanregung durch einen Funktionsgenerator – 0 Hz bis 600 Hz



Funktionsgenerator als
Anregungsquelle

Spektrum der Druckschwankung
an Pipeauslass

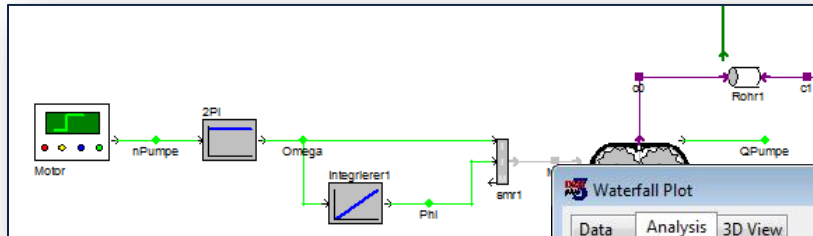


Inhalt

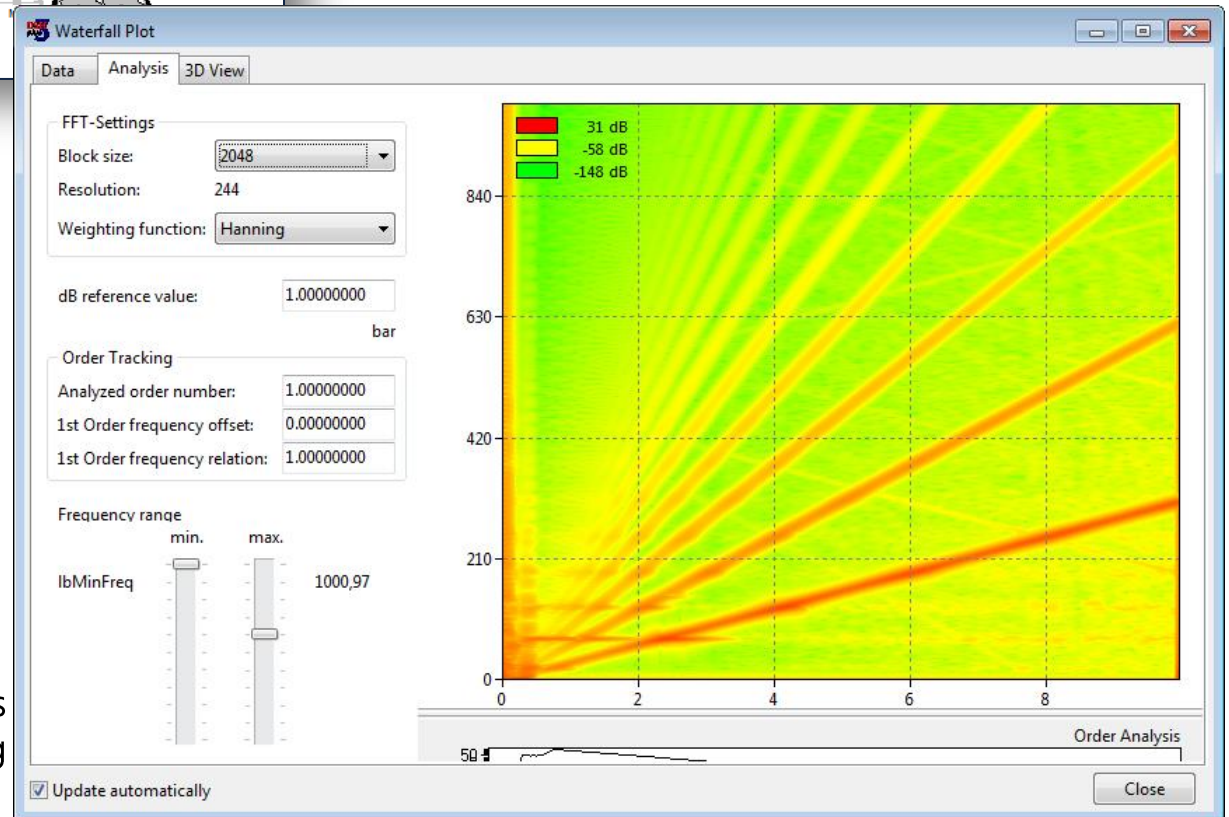
- 1** Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus
- 2** Simulation hydraulischer Leitungssysteme
- 3** Simulation von Dehnschlauchleitungen
- 4** Modellierung der Systemanregung
 - 4.1** Anregung über einen Druck- oder Volumenstromsweep
 - 4.2** Anregung mit geometrischem Pumpenmodell
 - 4.3 Anregung mit gemessener Pumpe

Breitbandige Anregung mit geometrischem Pumpenmodell

Drehzahlhochlauf einer 13-zähligen Außenzahnradpumpe – 0 1/min bis 1450 1/min



Einfaches Modell einer
Außenzahnradpumpe



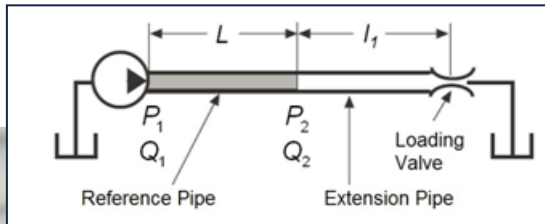
Spektrum der Drehzahl des
Pumpenhochlaufs

Inhalt

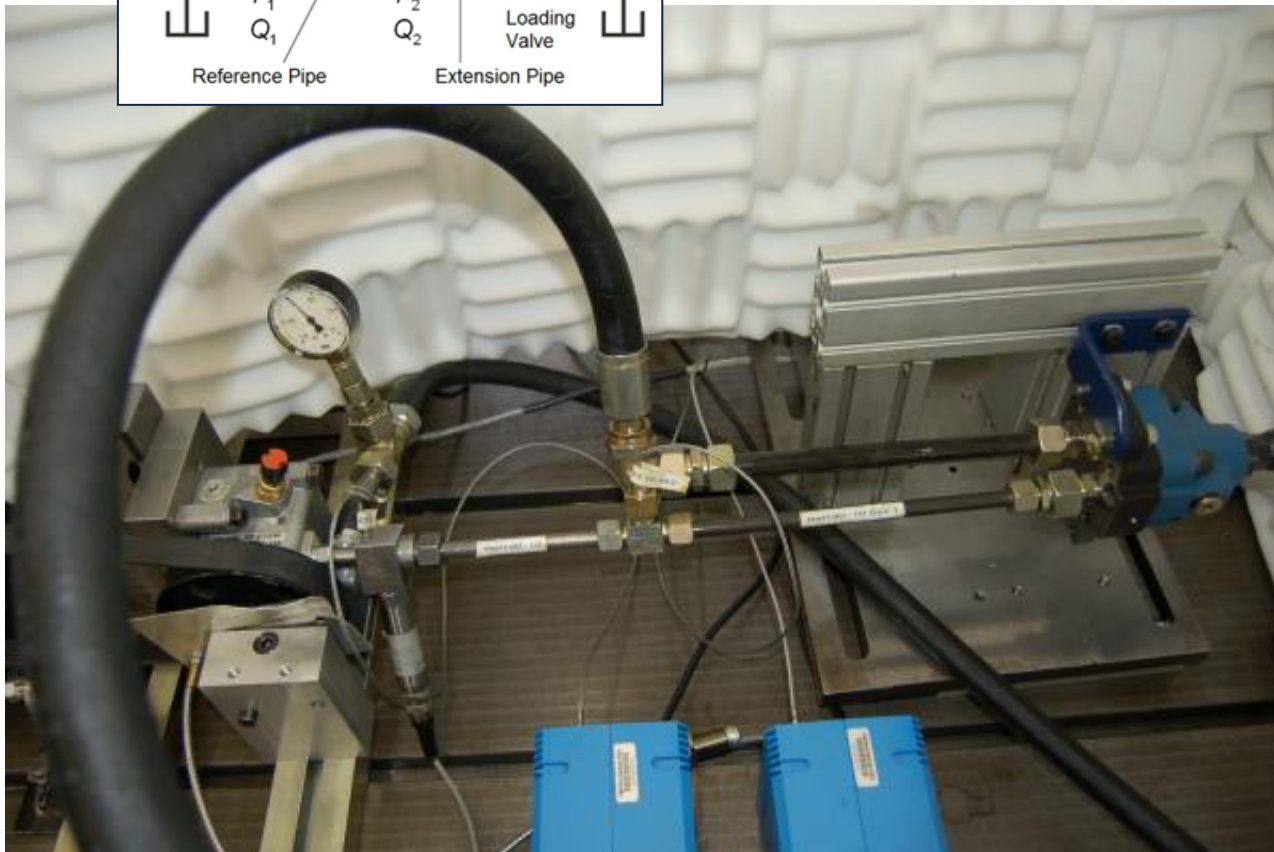
- 1** Einführung in die Leitungssimulation mit DSHplus
- 2** Simulation hydraulischer Leitungssysteme
- 3** Simulation von Dehnschlauchleitungen
- 4** Modellierung der Systemanregung
 - 4.1** Anregung über einen Druck- oder Volumenstromsweep
 - 4.2** Anregung mit geometrischem Pumpenmodell
 - 4.3** Anregung mit gemessener Pumpe

Pumpenprüfstand an der FH Köln

Messaufbau mit 10-zelliger Flügelzellenpumpe zur Bestimmung der Pumpenimpedanz



Hintergrund der Untersuchungen ist das aktuelle, durch das BMWi öffentlich-finanzierte Forschungsprojekt OptiELF



Gefördert durch:



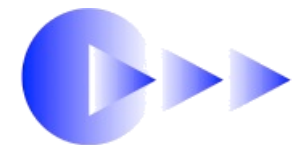
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Projektpartner:



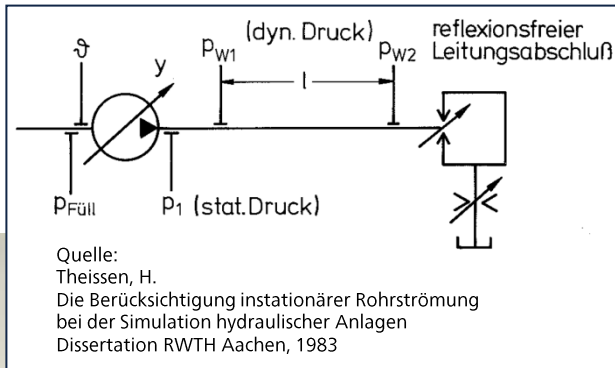
Labor für Fahrzeugschwingungen und -akustik



Labor für Kfz-Hydraulik

Pumpenprüfstand an der FH Köln

Messaufbau mit 10-zelliger Flügelzellenpumpe und Rala



Hintergrund der Untersuchungen ist das aktuelle, durch das BMWi öffentlich-finanzierte Forschungsprojekt OptiELF

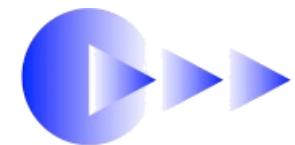
Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



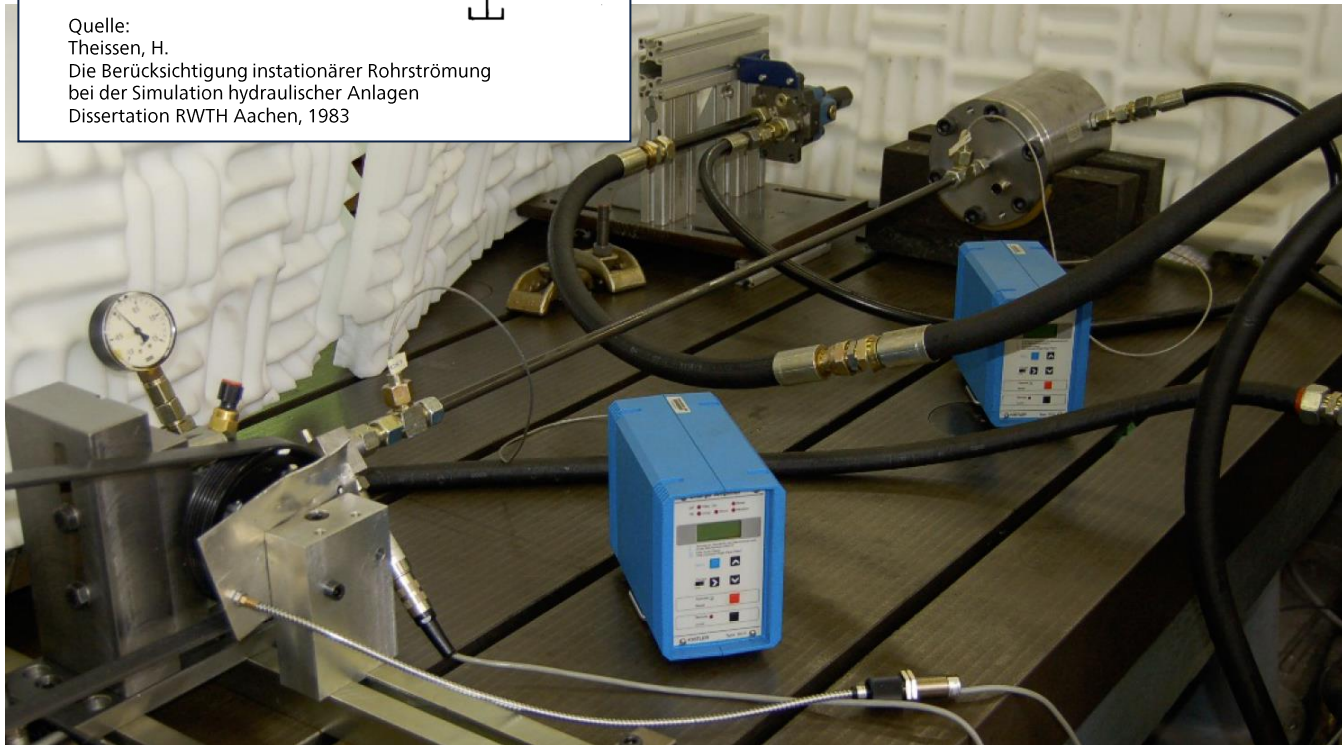
Projektpartner:



Labor für Fahrzeugschwingungen und -akustik

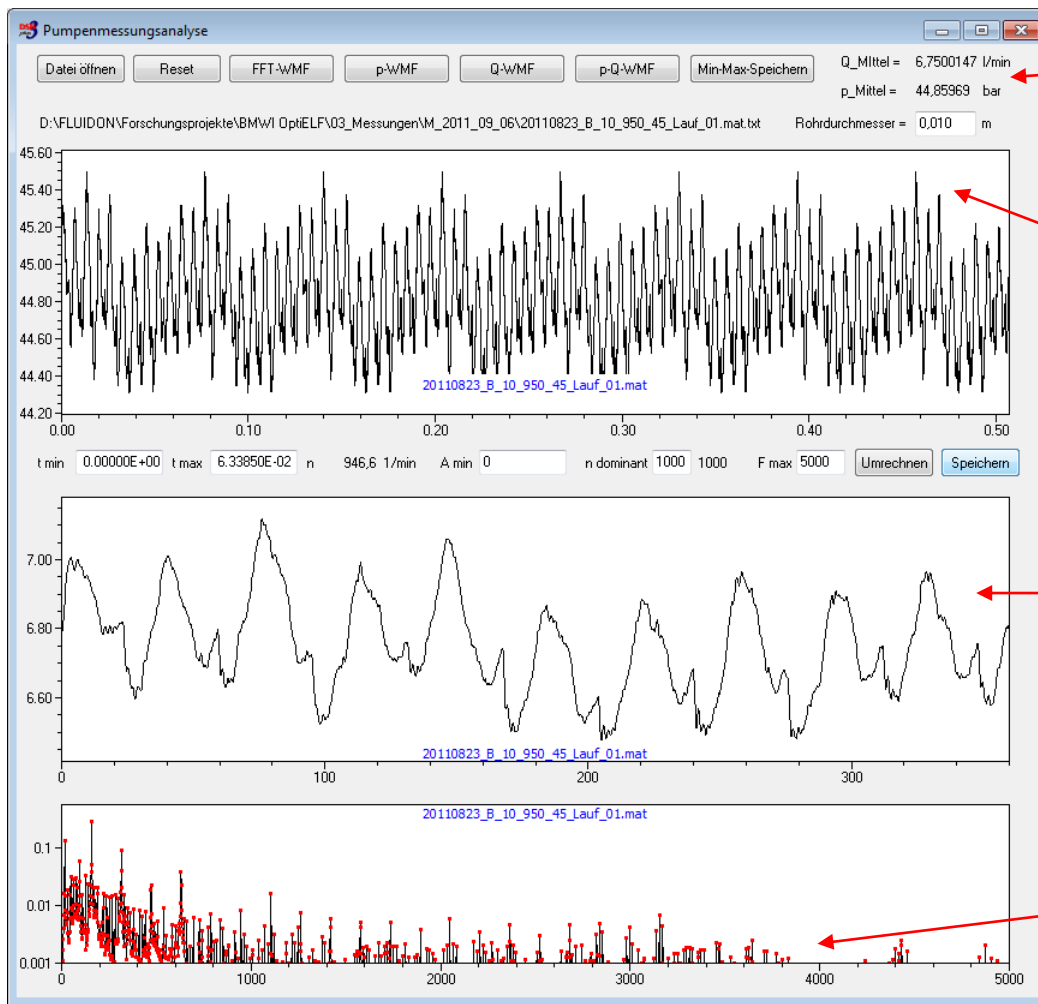


Labor für Kfz-Hydraulik



Pumpenprüfstand an der FH Köln

Umrechnung der Druckpulsation in eine Volumenstrompulsation



Mittelwerte des Drucks und des Volumenstroms

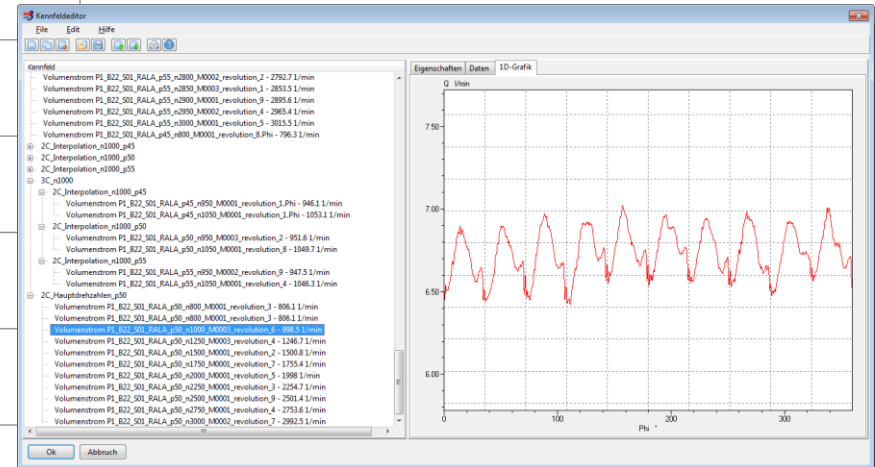
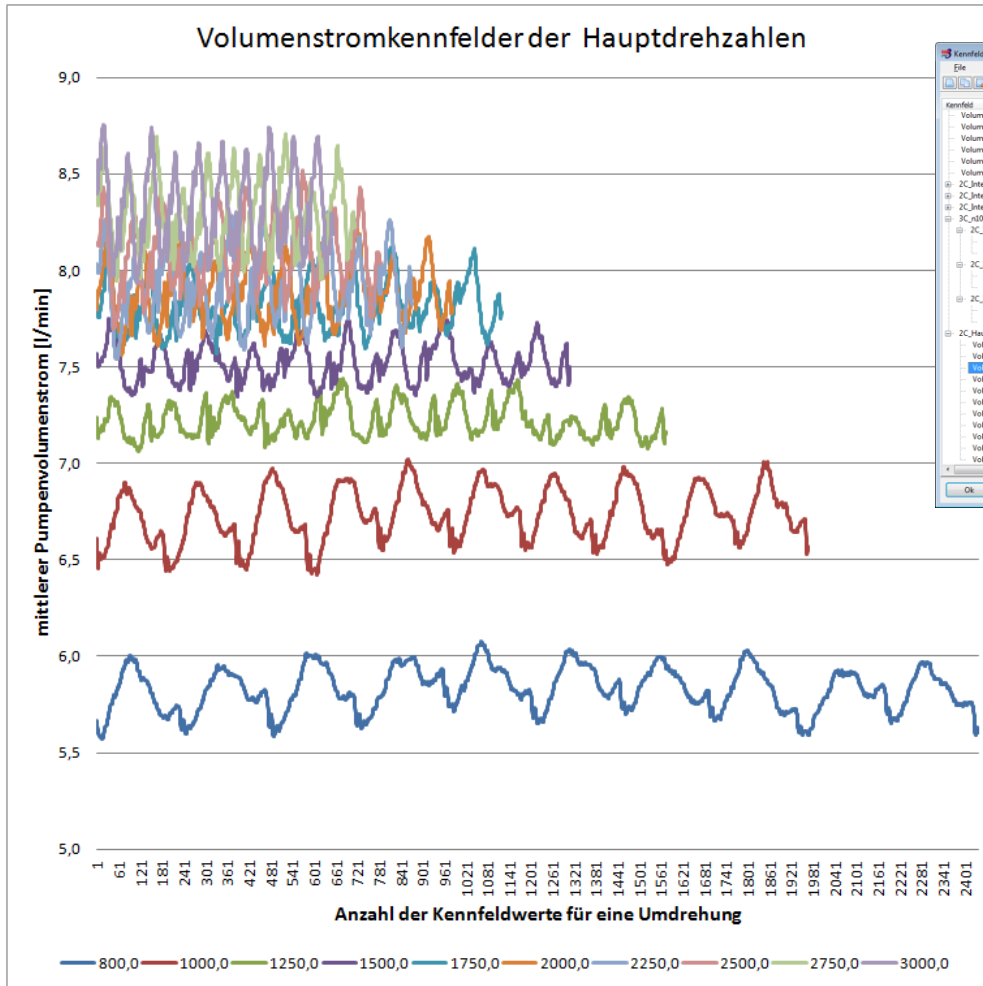
Charakteristische Druckpulsation am Pumpenflansch (hier 8 Umdrehungen)

Berechnete charakteristische Volumenstrompulsation am Pumpenflansch für eine Umdrehung

FFT Spektrum des Drucks am Pumpenflansch (rot markiert sind die für die Umrechnung berücksichtigten Spektrallinien)

Breitbandige Anregung mit gemessenem Pumpenkennfeld

Simulation einer 10-zelligen Flügelzellenpumpe mit 1 m Stahlleitung und Rala



Zusammenfassung der Einzelkennfelder zu einem mehrdimensionalen Linienkennfeld

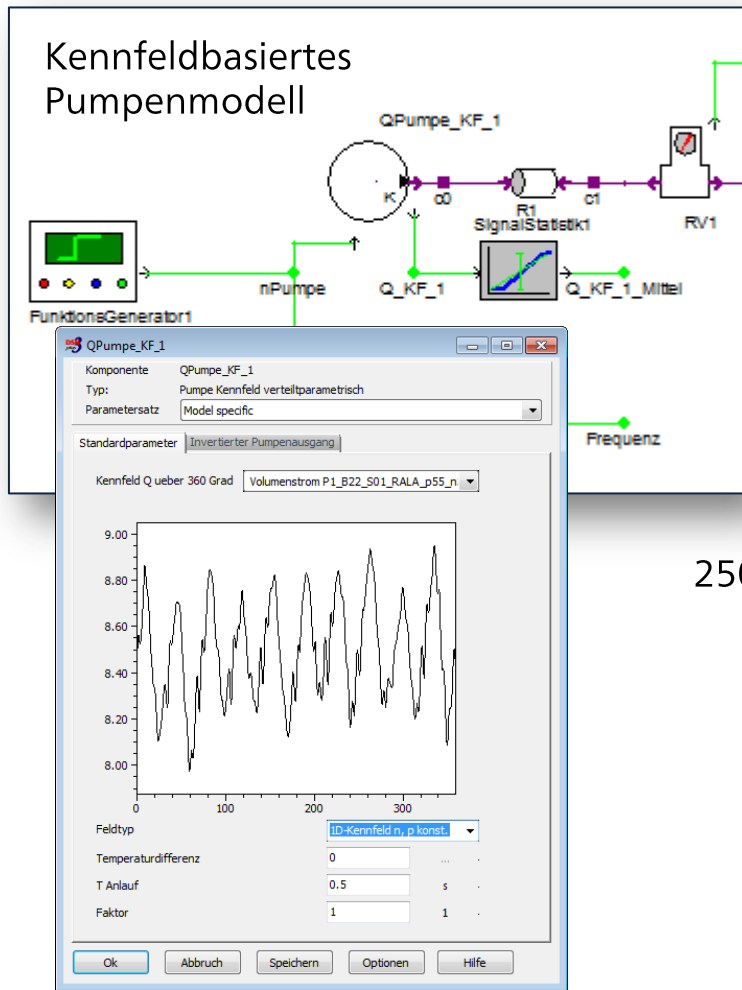
Die Abtastzeit während der Messung war konstant.

Hieraus resultiert, dass mit steigender Drehzahl die Anzahl der Werte pro Umdrehung kleiner wird.

Ein klassisches datenmatrixbasiertes Kennfeld lässt sich hieraus nur sehr mühsam erstellen

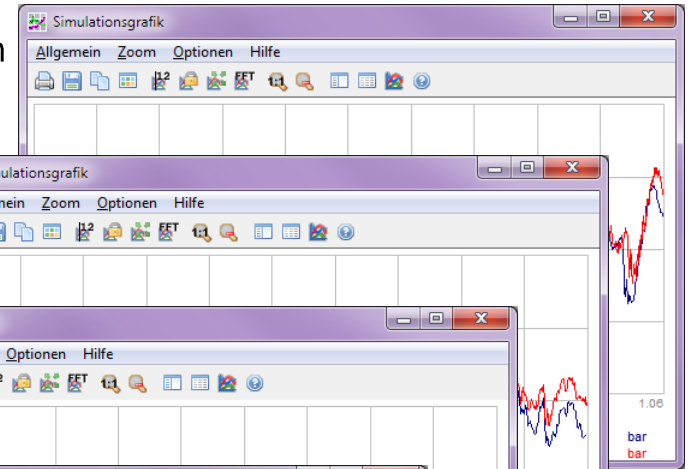
Breitbandige Anregung mit gemessenem Pumpenkennfeld

Simulation einer 10-zelligen Flügelzellenpumpe mit 1 m Stahlleitung und Rala

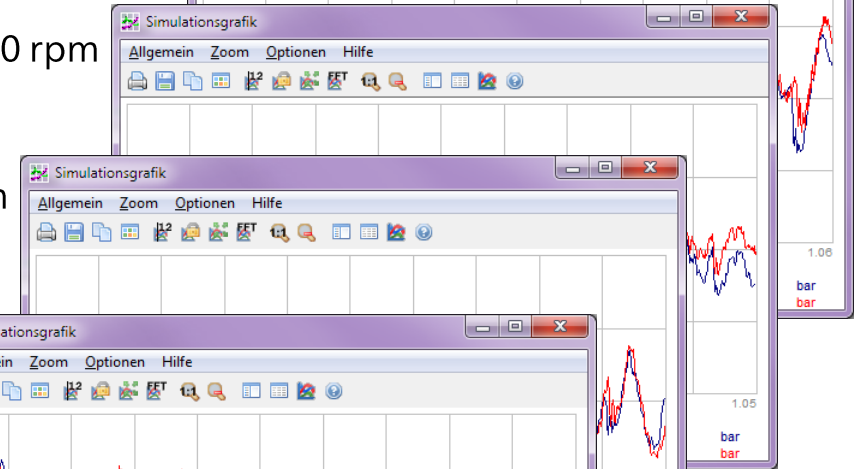


Vergleich von Messung und Simulation

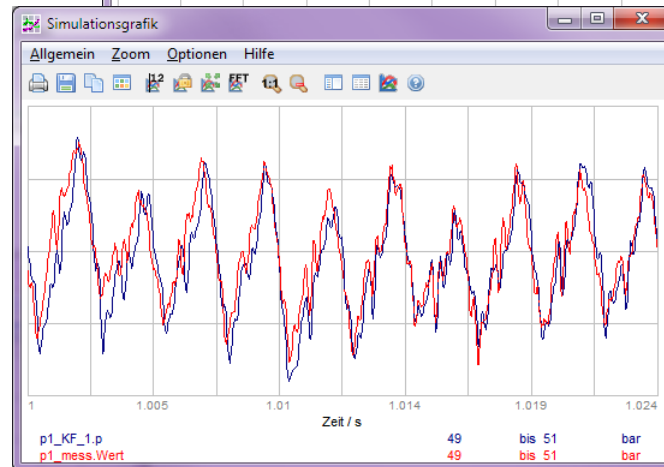
1000 rpm



1250 rpm



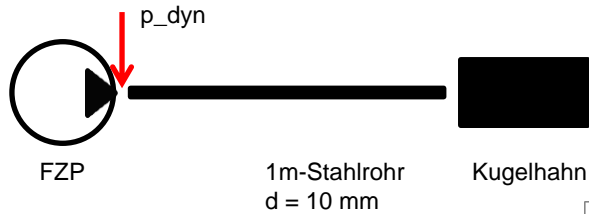
1500 rpm



2500 rpm

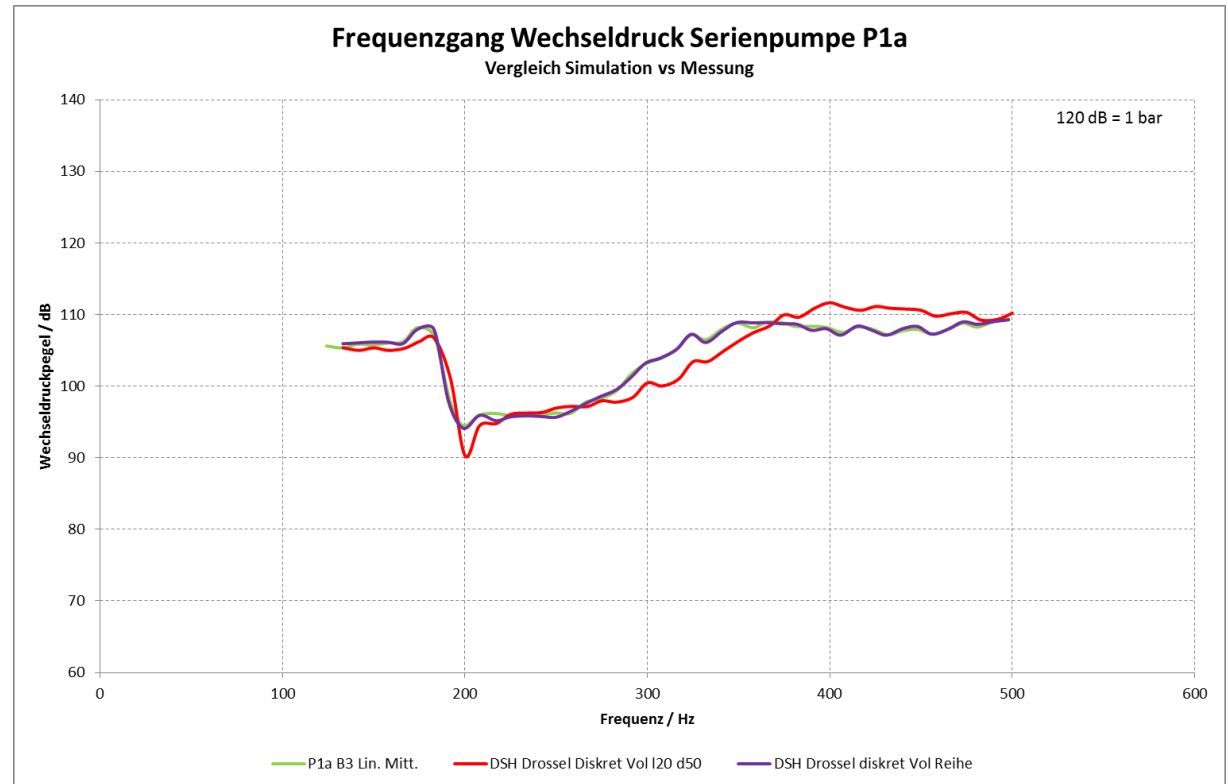
Breitbandige Anregung mit gemessenem Pumpenkennfeld

Wechseldrucksystem: Pumpe – Stahlrohrleitung – Ventil für 800 1/min bis 3000 1/min



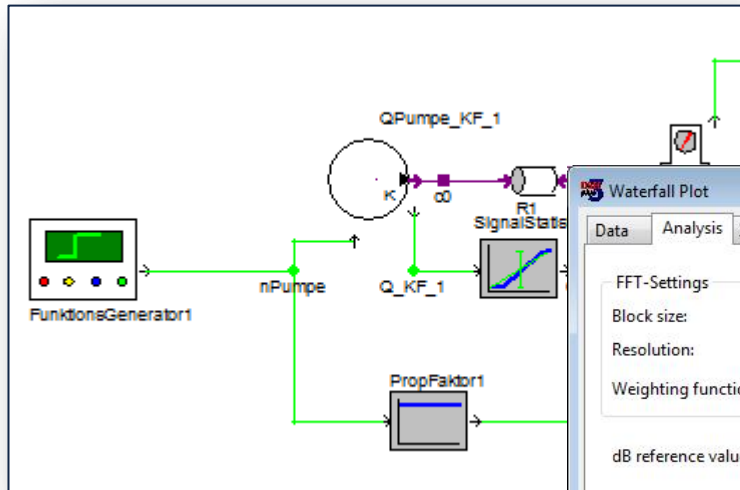
Die Auswertung erfolgt über die FFT des dynamischen Druckes am Rohreingang

Die Auswertung zeigt die Amplitude der 10. Ordnung (Pumpfrequenz) für 44 Einzelmessungen



Breitbandige Anregung mit gemessenem Pumpenkennfeld

Drehzahlhochlauf einer 10-zelligen Flügelzellenpumpe – 800 1/min bis 3000 1/min



Kennfeldbasiertes
Pumpenmodell

Spektralanalyse des Drucks
an Pumpenhochlauf

