

Analyse von Druckschwingungs- problemen mit RohrLEx

IFAS externes Kolloquium 24.4.2015

Dr.-Ing. Heiko Baum
FLUIDON GmbH



Übersicht

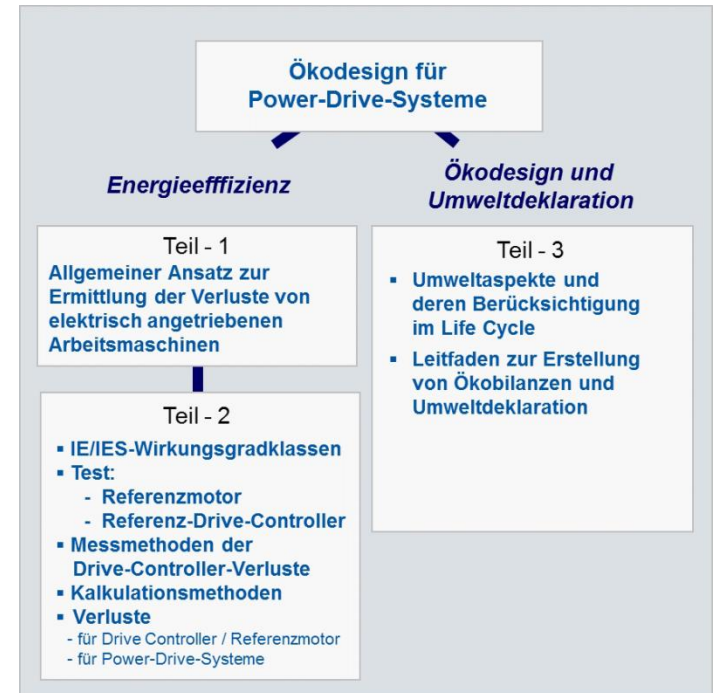
- 1 RohrLEx entdeckt die neue DIN EN 50598-2
- 2 Warum RohrLEx sich auf die DIN EN 50598-2 freut
- 3 RohrLEx präsentiert einen Beispielantrieb
- 4 RohrLEx analysiert den Beispielantrieb
- 5 RohrLEx verrät Tipps und Tricks
- 6 RohrLEx fasst zusammen



RohrLEx entdeckt die neue DIN EN 50598-2

Einleitung

- Am 1.1.2015 trat die europäische Norm EN 50598 in Kraft. Sie legt die Ökodesignanforderungen für elektrische Antriebssysteme im Niederspannungsbereich fest.
- Es gilt: „Neu in den Verkehr gebrachte Motoren mit einer Nennausgangsleistung von 7,5 bis 375 kW müssen entweder mindestens die Wirkungsgradklasse IE3 erreichen oder der Wirkungsgradklasse IE2 entsprechen, dürfen dann aber nur mit einer elektronischen Drehzahlregelung betrieben werden.“
- Motoren der Wirkungsgradklasse IE2 können also auch noch jetzt, nach dem Stichtag, in Verkehr gebracht werden, sofern sie mit einer elektronischen Drehzahlregelung in Betrieb genommen werden. Die elektronische Drehzahlregelung erfolgt mit einem Frequenzumrichter, der die Drehzahl des Motors und damit die abgegebene Leistung an den unterschiedlichen Bedarf anpasst.



- Übersicht Ökodesign-Produktnorm für Motorsysteme / Power-Drive-Systeme

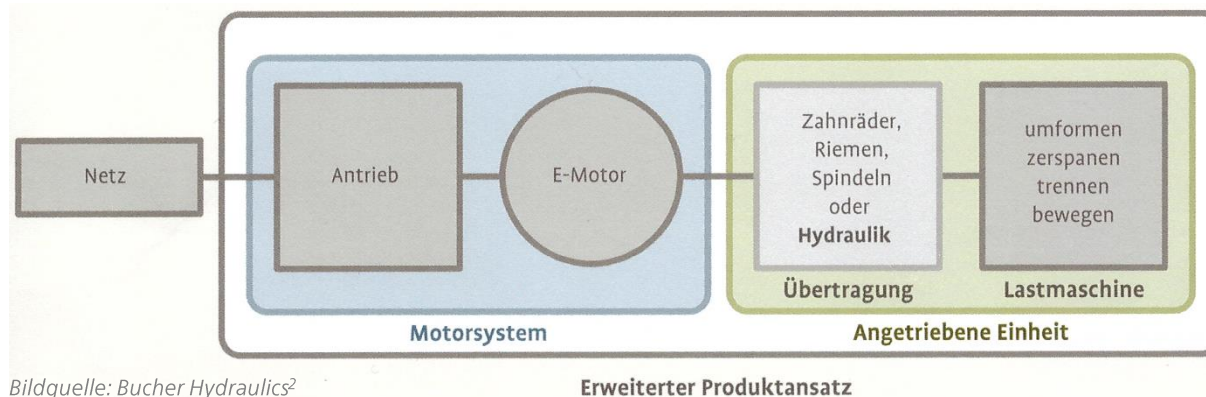
Quelle:

„Energieeffizienz mit elektrisch angetriebenen Arbeitsmaschinen – Norm EN 50598“; ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V.

RohrLEx entdeckt die neue DIN EN 50598-2

Gesamtbetrachtung des Antriebs nach DIN EN 50598-2

- Was bedeutet das für die Hydraulikbranche?
 - Alle Antriebssysteme, die in nennenswertem Umfang elektrische Energie umsetzen, müssen bezüglich ihres Wirkungsgrades beziehungsweise ihrer Verluste bewertet werden.¹
 - Verkürzt gesagt heißt das: In Teil 2 der Norm werden die Effizienzklassen von Motorsystemen und Drive Controllern, acht applikationsrelevante Betriebspunkte sowie die Methoden zur Messung und Berechnung der Verluste in diesen acht Betriebspunkten eines kompletten Motorsystems und dessen Komponenten festlegt.¹
 - In der neuen Norm wird die Kombination aus einem Motorsystem und einer angetriebenen Einrichtung betrachtet. Es zählt also nicht nur der Wirkungsgrad, sondern auch die Verlustleistung. Dieser Ansatz macht es attraktiv, Einsparungen in der Kombination verschiedener Elemente der Antriebseinheit zu suchen.²



Bildquelle: Bucher Hydraulics²

Quelle:

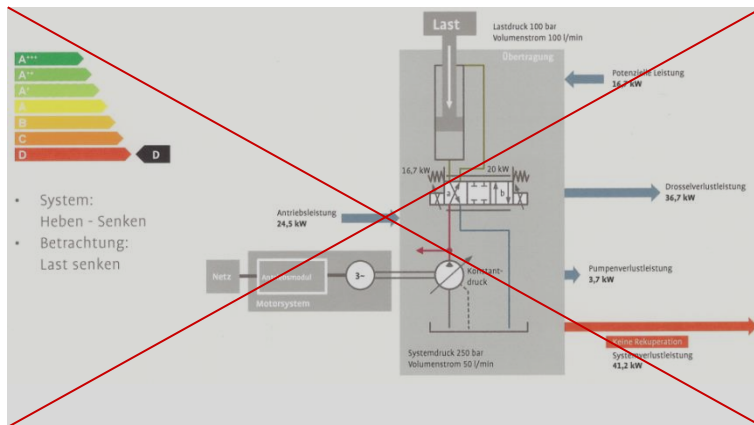
1: „Energieeffizienz mit elektrisch angetriebenen Arbeitsmaschinen – Norm EN 50598“; ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V.

2. Bucher Hydraulics, „Gesamtbetrachtung des Antriebs“ – 100-FL-000174-DE-00-04/2015

RohrLEx entdeckt die neue DIN EN 50598-2

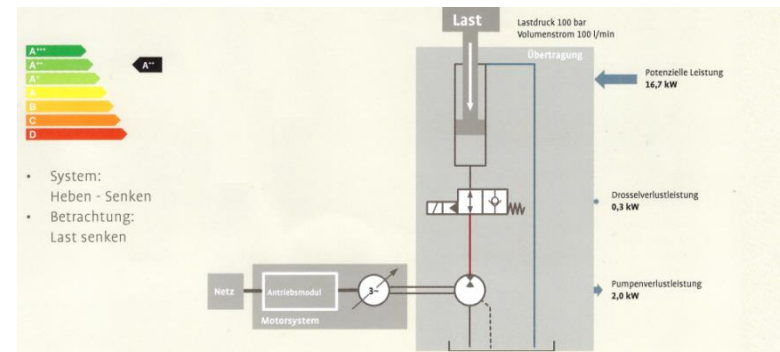
Was bedeutet dies für das Hydrauliksystem?

- Gegenwart
 - Herkömmliche Systemkonzepte mit hoher Verlustleistung werden immer kritischer gesehen.
- Das ist dann wohl „Out“!



- Aber ist das wirklich alles so einfach?

- Zukunft
 - Drehzahlvariable Pumpenantriebe verändern die Rahmenbedingungen für hydraulische Systeme und eröffnen neue Gestaltungsmöglichkeiten für effiziente Lösungen.
 - Dabei kommt es entscheidend auf das Zusammenspiel von perfekt aufeinander abgestimmten Komponenten und das tiefe physikalische Verständnis für die Hydraulik an.¹
- Das ist also „In“?



Quellen:

Bilder: Bucher Hydraulics, „Gesamtbetrachtung des Antrieb“ – 100-FL-000174-DE-00-04/2015

1: Bosch Rexroth, Sytronix – Drehzahlvariable Pumpenantriebe energieeffizient | leistungsstark | kostensenkend, RD08043, 2014-03

Übersicht

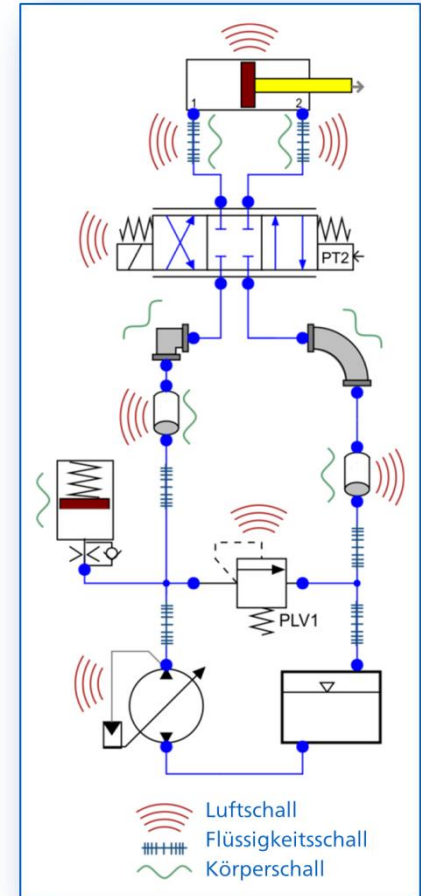
- 1 RohrLEx entdeckt die neue DIN EN 50598-2
- 2 Warum RohrLEx sich auf die DIN EN 50598-2 freut
- 3 RohrLEx präsentiert einen Beispielantrieb
- 4 RohrLEx analysiert den Beispielantrieb
- 5 RohrLEx verrät Tipps und Tricks
- 6 RohrLEx fasst zusammen



Warum RohrLEx sich auf die DIN EN 50598-2 freut

Hier erwartet RohrLEx zukünftig Handlungsbedarf

- Aus langjähriger Berufserfahrung weiß RohrLEx, dass Druck- und Volumenstrompulsationen in fluidtechnischen Systemen eine häufige Ursache für **Probleme und Beanstandungen** sind, besonders wenn es im **Leitungsnetz** zum **Resonanzfall** kommt.
- Aus den Pulsationen resultiert **Flüssigkeitsschall**, der sich im Leitungsnetz ausbreitet und als Wechselbelastung die Körperschallanregung der umgebenden Bauteile bewirkt. Hierdurch kommt es zu unerwünschten **Geräuschemissionen**, die Bauteile erfahren **ungünstige Dauerbelastungen**, und natürlich wird auch die **Funktion und Zuverlässigkeit** des Hydrauliksystems **negativ beeinträchtigt**.
- RohrLEx hat außerdem gelernt, dass **Pumpen die wesentliche Quelle** des Flüssigkeitsschalls sind. Ursächlich ist der nichtkontinuierliche Fördervorgang innerhalb der Pumpen, der zu einer zyklischen Volumenstromabgabe in das angeschlossene Leitungsnetz führt.
- Wird die Pumpe außerdem **bei variablen Drehzahlen betrieben**, wie dies z. B. bei frequenzgeregelten Pumpenantrieben oder bei Automobil- und Mobilhydrauliksystemen der Fall ist, so **regt dies das Leitungsnetz breitbandig an**, und es besteht erst recht die Gefahr, dass eine Resonanzsituation eintritt.



Warum RohrLEx sich auf die DIN EN 50598-2 freut

Was sagen die Hersteller dazu?



VOITH

Die Zukunft – intelligente Servopumpenantriebe.



Rexroth

Bosch Group
Sytronix – Drehzahlvariable Pumpenantriebe
energieeffizient | leistungsstark | kostensenkend



Merkmale	Vorteile	Nutzen
<ul style="list-style-type: none"> Reduzierung der Pumpendrehzahl im Teillastbereich und außerhalb des Maschinenzyklus. 	<ul style="list-style-type: none"> Das Energieeinsparpotenzial in hydraulischen Systemen beträgt bis zu 70%. Die Geräuschemission verringert sich bis zu 20 dB(A). 	<ul style="list-style-type: none"> + Mit dem reduzierten TCO + Aufwandsmaßnahme Arbeit Zusatz
<ul style="list-style-type: none"> Integrierte Prozessüberwachung. 	<ul style="list-style-type: none"> Das Antriebssystem ist diagnosefähig und Industrie-4.0-ready. 	<ul style="list-style-type: none"> + Sie kürzester Zeit. + Stillstandszeiten der Maschine oder Anlage sind erheblich geringer. + Vor-Ort-Serviceeinsätze lassen sich um bis zu 70 % reduzieren.
<ul style="list-style-type: none"> Volumenstrom- oder Druckregelung direkt durch das Pumpensystem – nicht über Ventltechnik. 	<ul style="list-style-type: none"> Die hydraulische Verlustleistung im System ist geringer. Der Wärmebeitrag in das Hydrauliksystem ist geringer. 	<ul style="list-style-type: none"> + Ihr Kühlsystem ist einfacher und Sie sparen dadurch Investitionskosten. + Eine geringere Kühlleistung hat niedrigere
<ul style="list-style-type: none"> Keine oder reduzierte klassische Ventltechnik für die Regelung. 	<ul style="list-style-type: none"> Das System ist weniger komplex 	
<ul style="list-style-type: none"> Hochdynamische Regelung mit Servopumpen. Geringes Massenträgheitsmoment der Innenzahnradpumpe. 	<ul style="list-style-type: none"> Die Zykluszeiten von Aktuatoren lassen sich bis zu 50% verkürzen. 	
<ul style="list-style-type: none"> Regelparameter der Servopumpe im Servourrichter integriert. 	<ul style="list-style-type: none"> Voith-Servopumpen sind sofort betriebsbereit. 	

Der Regler erfasst kontinuierlich Volumenstrom- und Druck-Sollwert der Maschinensteuerung und vergleicht sie mit dem Druck-Istwert. Damit die Pumpe exakt die Ölmenge fördert, die zur Bereitstellung des Sollwertes erforderlich ist, wird die Antriebsdrehzahl des Elektromotors entsprechend reguliert. Die Motordrehzahl wird so gesteuert, dass die Pumpe die dem Volumenstrom-Sollwert entsprechende Ölmenge fördert.

Quelle: Parker, Drive Controlled Pump - Energieeffiziente Hydraulik-Systemlösungen; Katalog HY11-3352/DE

Energy on Demand – leistungsstarke Hydraulik intelligent geregelt

Durch die Integration der hydraulischen Regelintelligenz in den elektrischen Antrieb lässt sich die Drehzahl des Motors an den Bedarf der Maschine anpassen. Die Drehzahl des Pumpenantriebs wird dabei energiesparend und geräuscharm abgesenkt, sobald der Prozess nicht die volle Leistung abrufen. Bei hohem Anteil des Teillastbetriebs an der Zykluszeit lässt sich so nicht nur der Lärmpegel absenken, sondern auch viel Energie einsparen.

Quelle: Bosch Rexroth, Sytronix – Drehzahlvariable Pumpenantriebe energieeffizient | leistungsstark | kostensenkend

RD08043, 2014-03,
+ Unsere Servopumpensysteme sind ideal für Retrofit-Lösungen

Quelle: Voith, Die Zukunft – intelligente Servopumpenantriebe. G 2353 de, ak, 2015-04.

Warum RohrLEx sich auf die DIN EN 50598-2 freut

Zusammenfassung

- RohrLEx hat in den Herstellerdatenblättern folgende druckschwingungsrelevante Randbedingungen identifiziert.
- Die drehzahlgeregelten Pumpensysteme werden sowohl für Druck- und Volumenstromregelung als auch für Kraft- und Geschwindigkeitsregelung sowie für Positions- oder Leistungsregelung angepriesen.
- Alle Hersteller schreiben, dass ihre Pumpen eine geringe Pulsation des Volumenstromes aufweisen. Dies mag zwar stimmen, ist im Resonanzfall und bei geringer Systemdämpfung aber eher unerheblich.
- Zur Anwendung kommen Axialkolbenpumpen, Innenzahnradpumpen und Flügelzellenpumpen mit unterschiedlich vielen Verdrängerräumen z .
- Der Drehzahlbereich n der Antriebe reicht von Druckhaltefunktion (sehr geringe Drehzahl) bis zu max. 4500 1/min.



Übersicht

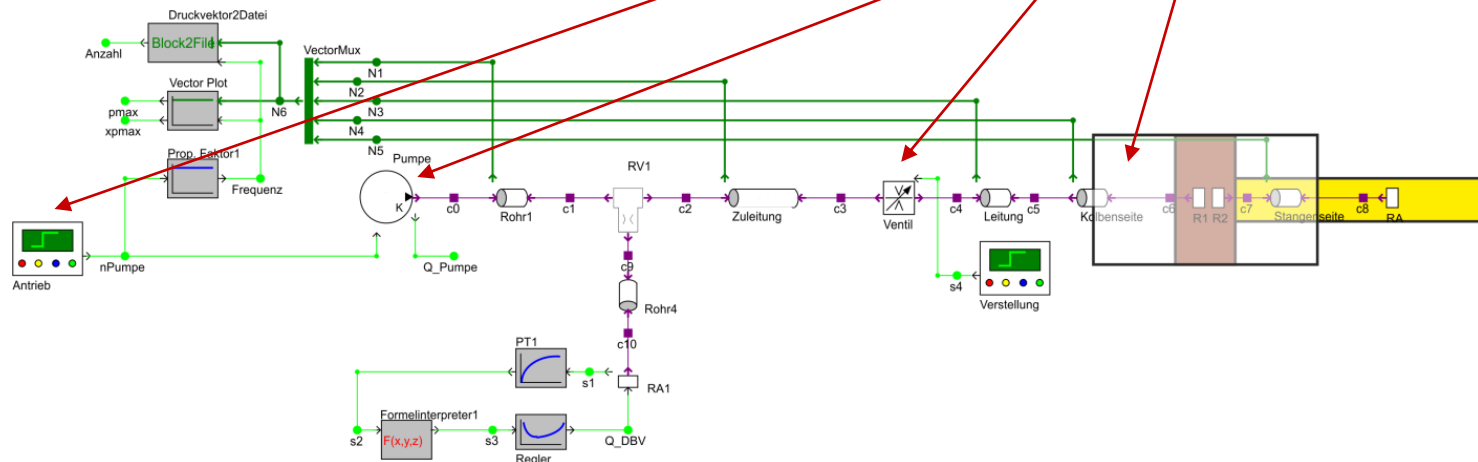
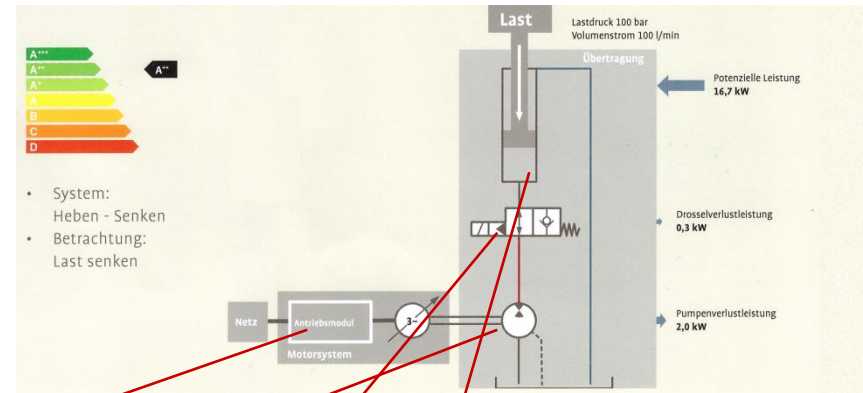
- 1 RohrLEx entdeckt die neue DIN EN 50598-2
- 2 Warum RohrLEx sich auf die DIN EN 50598-2 freut
- 3 RohrLEx präsentiert einen Beispielantrieb
- 4 RohrLEx analysiert den Beispielantrieb
- 5 RohrLEx verrät Tipps und Tricks
- 6 RohrLEx fasst zusammen



RohrLex präsentiert einen Beispielantrieb

Beispielantrieb

- In Anlehnung an den zuvor gezeigten einfachen Zylinderantrieb ...
- ... wird der folgende Zylinderantrieb simuliert

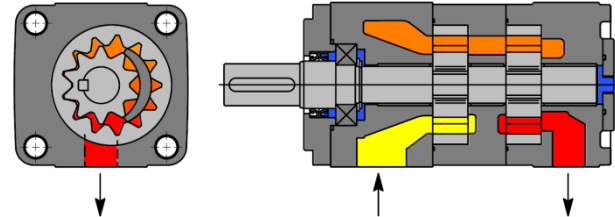
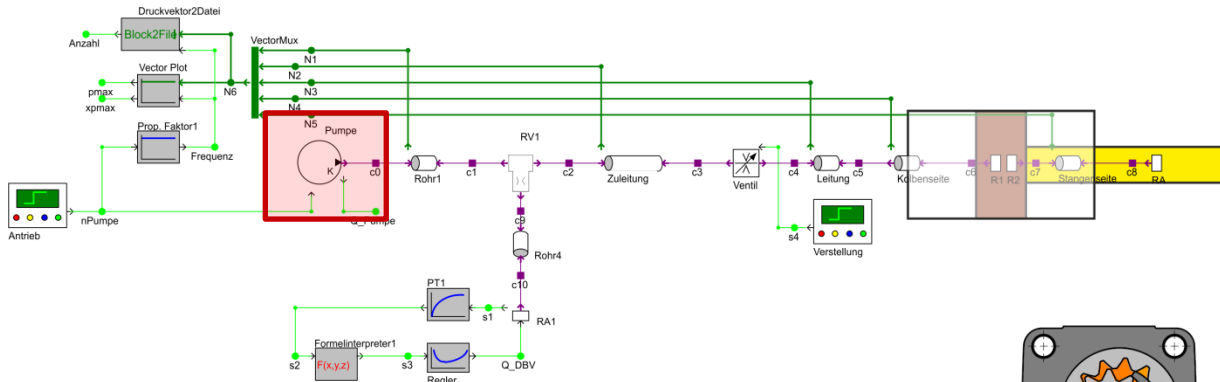


Quelle:

Bucher Hydraulics, „Gesamtbetrachtung des Antrieb“ – 100-FL-000174-DE-00-04/2015

RohrLex präsentiert einen Beispielantrieb

Basisdaten der Pumpe



- Entsprechend der Zeichnung wird für die Innenzahnradpumpe $z = 10$ angenommen
- $V_g = 32,4 \text{ cm}^3$
- $n_{max} = 3600 \text{ 1/min}$
- $Q_{max.th.} = 116,64 \text{ l/min}$
- Der Systemdruck ist 100 bar

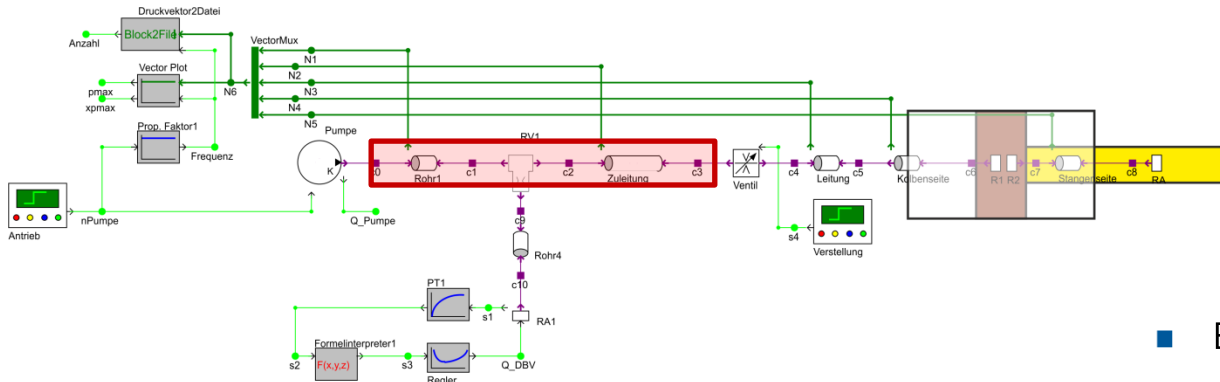
Verdrängungsvolumen cm ³ /U	Drehzahl min ⁻¹		Typ	Druckbereich in bar (bei $n > 700 \text{ min}^{-1}$)		Drehmoment ³⁾ Nm	Leistungsaufnahme ⁴⁾ KW
	min	max		Dauerdruck bar	Spitzendruck ²⁾ bar		
20,4		3600	QX42-020			68	10,8
26,1			QX42-025	210	250	84	12,4
32,4	5)		QX42-032			108	17,2
39,3			QX52-040			132	21,5
50,6		3000	QX52-050	210	250	170	26,9
63,7			QX52-063			213	33,9
80,2			QX62-080		250	268	43,0
101,0		2300	QX62-100	210		338	53,8
124,8			QX62-125			417	67,2
163,0		1800	QX82-160			544	86,1
201,3		1900	QX82-200	210	250	672	107,6
249,2		1700	QX82-250			833	134,5



Quelle:
100--P--000034--D--01 / 09.06

RohrLex präsentiert einen Beispielantrieb

Basisdaten der Leitung



- Bestimmung des erforderlichen Durchflussquerschnitts

- $Q_{max.th.} = 116,64 \text{ l/min}$
- $d_i \approx 22 \text{ mm}$
- $l = 3000 \text{ mm}$
- $f_{\lambda/2.th.} = \frac{c}{2 \cdot l} = \frac{1350 \frac{m}{s}}{2 \cdot 3m} = 225 \text{ Hz}$
- $f_{\lambda/4.th.} = \frac{c}{4 \cdot l} = \frac{1350 \frac{m}{s}}{4 \cdot 3m} = 112,5 \text{ Hz}$

Quelle: Parker - Verschraubungs-Technik
Technisches Handbuch/Katalog 4100-9/DE

Nach der Tabelle kann der empfohlene Innendurchmesser für die erforderliche Durchflussmenge des Leitungstyps bestimmt werden. Die Tabelle basiert auf folgenden empfohlenen Durchflussgeschwindigkeiten (DIN 24346):

- Druckleitung – 3 → 5 $\left[\frac{m}{s} \right]$
- Rücklaufleitung – 2 → 4 $\left[\frac{m}{s} \right]$
- Saugleitung – 1 $\left[\frac{m}{s} \right]$

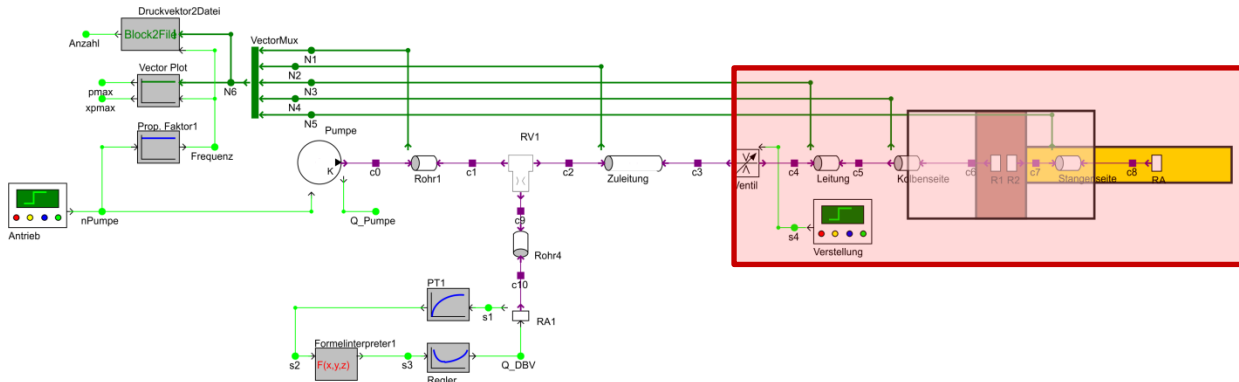
Wenn eine andere Durchflussgeschwindigkeit gewünscht wird, kann der erforderliche Innendurchmesser nach folgender Formel berechnet werden:

$$\text{Rohr - A.D. [mm]} = 4,61 \cdot \sqrt{\frac{\text{Durchflussmenge} \left[\frac{\text{ltr.}}{\text{min}} \right]}{\text{Durchflussgeschwindigkeit} \left[\frac{m}{s} \right]}}$$

Maximum l/min	Rohrinnendurchmesser		
	5 m/s Druckleitung	3 m/s Rücklaufleitung	1 m/s Saugleitung
1	2,1	2,7	4,6
2	2,9	3,8	6,5
3	3,6	4,6	8,0
...
80	18,4	23,8	41,2
85	19,0	24,5	42,5
90	19,6	25,3	43,7
95	20,1	25,9	44,9
100	20,6	26,6	46,1
110	21,6	27,9	48,4
120	22,6	29,2	50,5
130	23,5	30,3	52,6
140	24,4	31,5	54,5
150	25,3	32,6	56,5
160	26,1	33,7	58,3
170	26,9	34,7	60,1
180	27,7	35,7	61,8
190	28,4	36,7	63,5
200	29,2	37,6	65,2

RohrLex präsentiert einen Beispielantrieb

Basisdaten des Zylinders



- Auswahl eines Standardzylinders

- Es wird ein Zylinder mit 80 mm Bohrung ausgewählt
- Für $Q_{max\ th.} = 116,64\ l/min$ ergibt sich daraus
- $V_{max} \approx 38,6\ cm/s$

Schubkraft

Bohrungs-Ø mm	Kolbenfläche Zylinder mm²	Schubkraft Zylinder in kN						
		10 bar	40 bar	63 bar	100 bar	125 bar	160 bar	210 bar
25	491	0,5	2,0	3,1	4,9	6,1	7,9	10,3
32	804	0,8	3,2	5,1	8,0	10,1	12,9	16,9
40	1257	1,3	5,0	7,9	12,6	15,7	20,1	26,4
50	1964	2,0	7,9	12,4	19,6	24,6	31,4	41,2
63	3118	3,1	12,5	19,6	31,2	39,0	49,9	65,5
80	5027	5,0	20,1	31,7	50,3	62,8	80,4	105,6
100	7855	7,9	31,4	49,5	78,6	98,2	125,7	165,0
125	12272	12,3	49,1	77,3	122,7	153,4	196,4	257,7
160	20106	20,1	80,4	126,7	201,1	251,3	321,7	422,2
200	31416	31,4	125,7	197,9	314,2	392,7	502,7	659,7

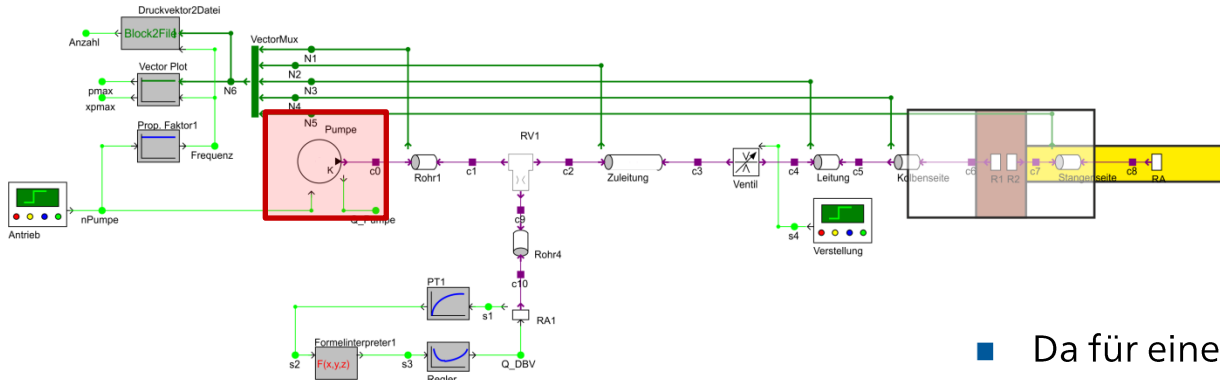
Bohrungs-Ø	Kolbenstange	
	Nr.	MM ø
25	1	12
	2	18
32	1	14
	2	22
40	1	18
	2	28
50	1	22
	2	36
	3	28
63	1	28
	2	45
	3	36
80	1	36
	2	56
	3	45
100	1	45
	2	70
	3	56
125	1	56
	2	90
	3	70
160	1	70
	2	110
	3	90
200	1	90
	2	140
	3	110

Standardkolbendichtungen eignen sich für Last-haltefunktionen, da sie unter normalen Bedingungen einen leckfreien Kolbenbetrieb sichern. Standard-Kolbendichtungen sind serienmäßig in den Zylindern der Baureihen HMI und HMD eingebaut und eignen sich für Kolbengeschwindigkeiten von bis zu 0,5 m/s.

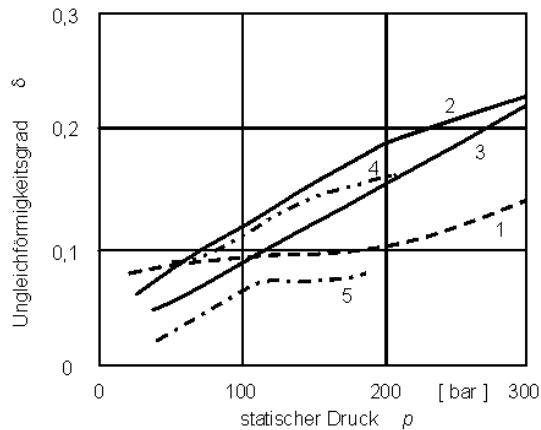
Quelle: Parker - HMI/HMD Hydraulikzylinder Katalog HY07-1150/DE

RohrLex präsentiert einen Beispielantrieb

Schwingungsanregung durch die Pumpe

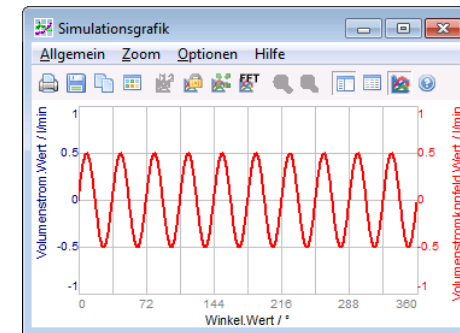


■ Gemessener Pulsationsgrad von Pumpen



Quelle: Umdruck Grundlagen der Fluidtechnik – Teil 1 Hydraulik – 2001

- Da für eine Innenzahnradpumpe kein Pulsationsgrad angegeben ist, nutzt RohrLex für eine erste Druckschwingungsanalyse eine idealisierte Volumenstrompulsation von $0,5 \text{ l/min}$.



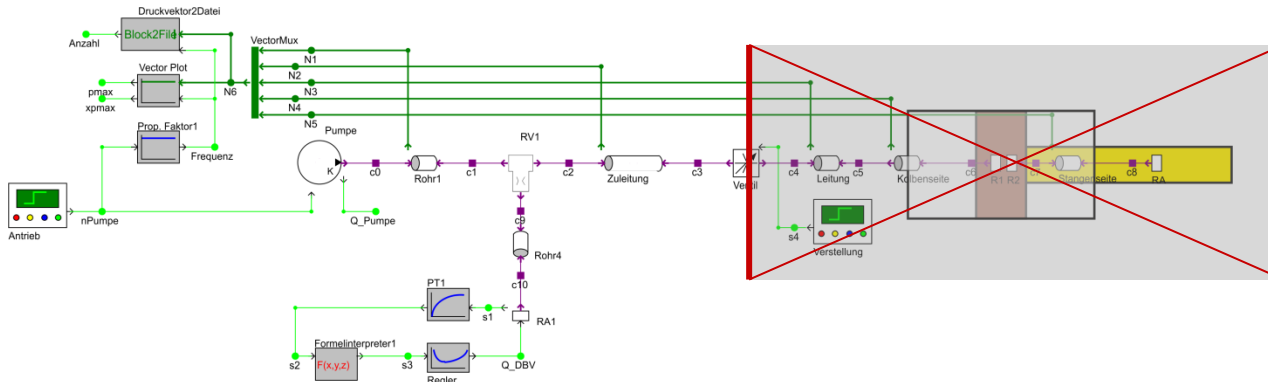
Übersicht

- 1 RohrLEx entdeckt die neue DIN EN 50598-2
- 2 Warum RohrLEx sich auf die DIN EN 50598-2 freut
- 3 RohrLEx präsentiert einen Beispielantrieb
- 4 RohrLEx analysiert den Beispielantrieb
- 5 RohrLEx verrät Tipps und Tricks
- 6 RohrLEx fasst zusammen

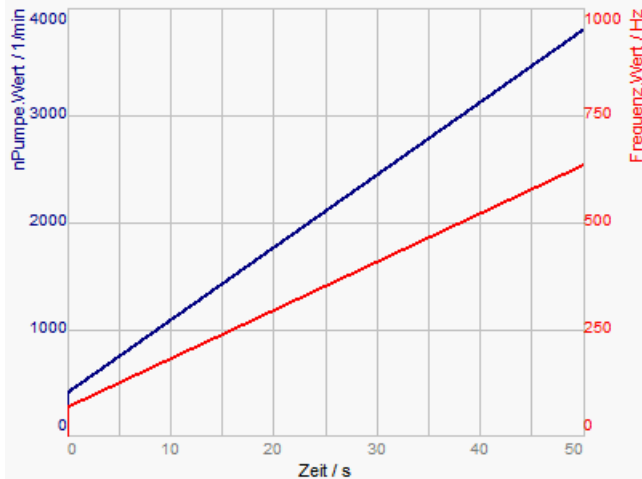


RohrLex analysiert den Beispielantrieb

Simulation eines Pumpenhochlaufs bei abgesperstem Zylinder



- Der Zylinder ist zunächst durch das Ventil abgesperrt



- In der Simulation wird in 50 s eine Drehzahlrampe durchfahren
- Der Frequenzbereich der Systemanregung berechnet sich wie folgt:

$$n_{min} = 400 \text{ 1/min}$$

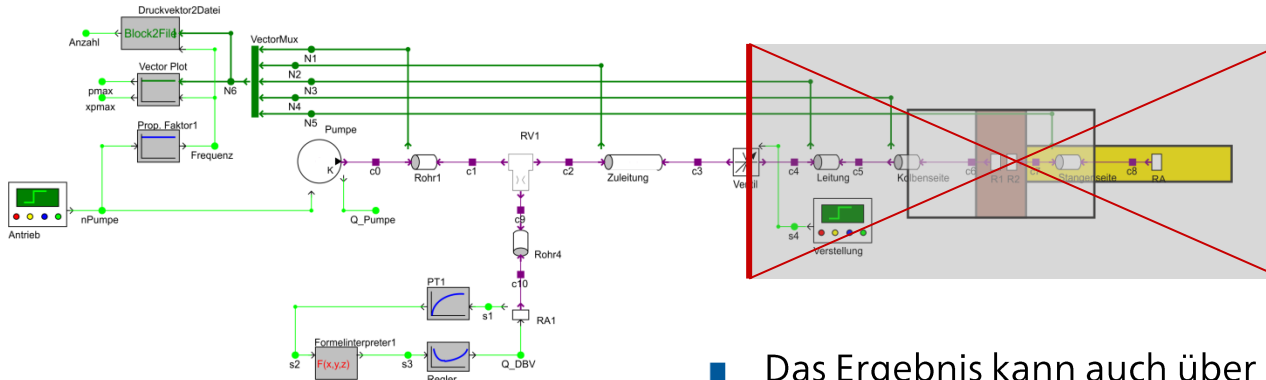
$$f_{min} = z * n_{min} \approx 67 \text{ Hz}$$

$$n_{max} = 3800 \text{ 1/min}$$

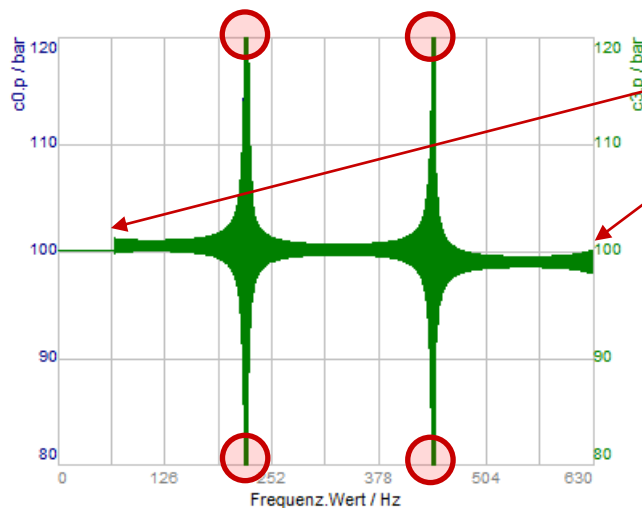
$$f_{max} = z * n_{max} \approx 633 \text{ Hz}$$

RohrLex analysiert den Beispielantrieb

Simulation eines Pumpenhochlaufs bei abgesperrem Zylinder



- Der Zylinder ist zunächst durch das Ventil abgespermt



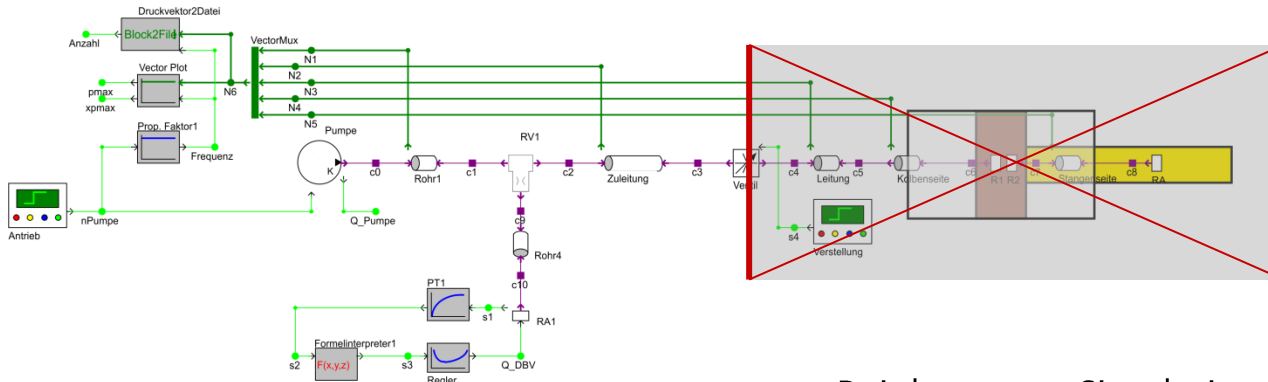
- Das Ergebnis kann auch über der Frequenz aufgetragen werden. Die Eckfrequenzen der Anregung sind also

$$f_{min} = z * n_{min} \approx 67 \text{ Hz}$$

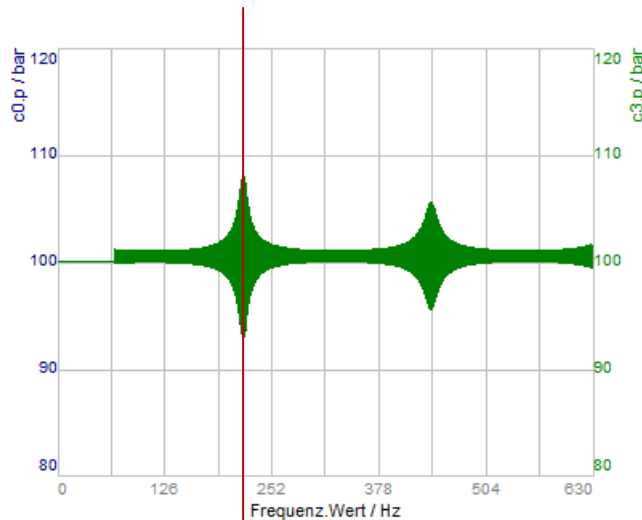
$$f_{max} = z * n_{max} \approx 633 \text{ Hz}$$
- Die Leitung ist beiderseitig geschlossen, so dass eine $\lambda/2$ -Resonanzbedingung vorliegt.
- Die Resonanz liegt in der Simulation bei $\approx 224 \text{ Hz}$, was ungefähr dem theoretischen Wert entspricht.
- Die ungünstige Skalierung der y-Achse lässt aber bereits vermuten, dass hier absichtlich etwas noch nicht ganz stimmig ist!

RohrLex analysiert den Beispielantrieb

Simulation eines Pumpenhochlaufs bei abgesperrem Zylinder



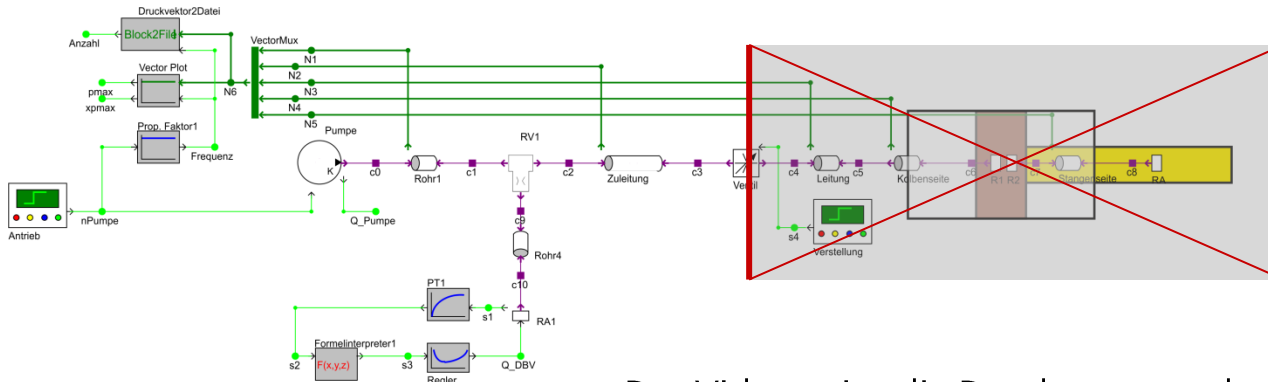
- Der Zylinder ist zunächst durch das Ventil abgesperrt



- Bei der ersten Simulation wurde in den Rohrleitungen die frequenzabhängige Reibung ausgeschaltet.
- Erst mit der frequenzabhängigen Reibung ergeben sich Resonanzfrequenzen und Resonanzamplituden, die zu real gemessenen Werten passen.
- Mit frequenzabhängiger Reibung hat sich die $\lambda/2$ -Resonanz der Leitung von ≈ 224 Hz auf ≈ 218 Hz verschoben.

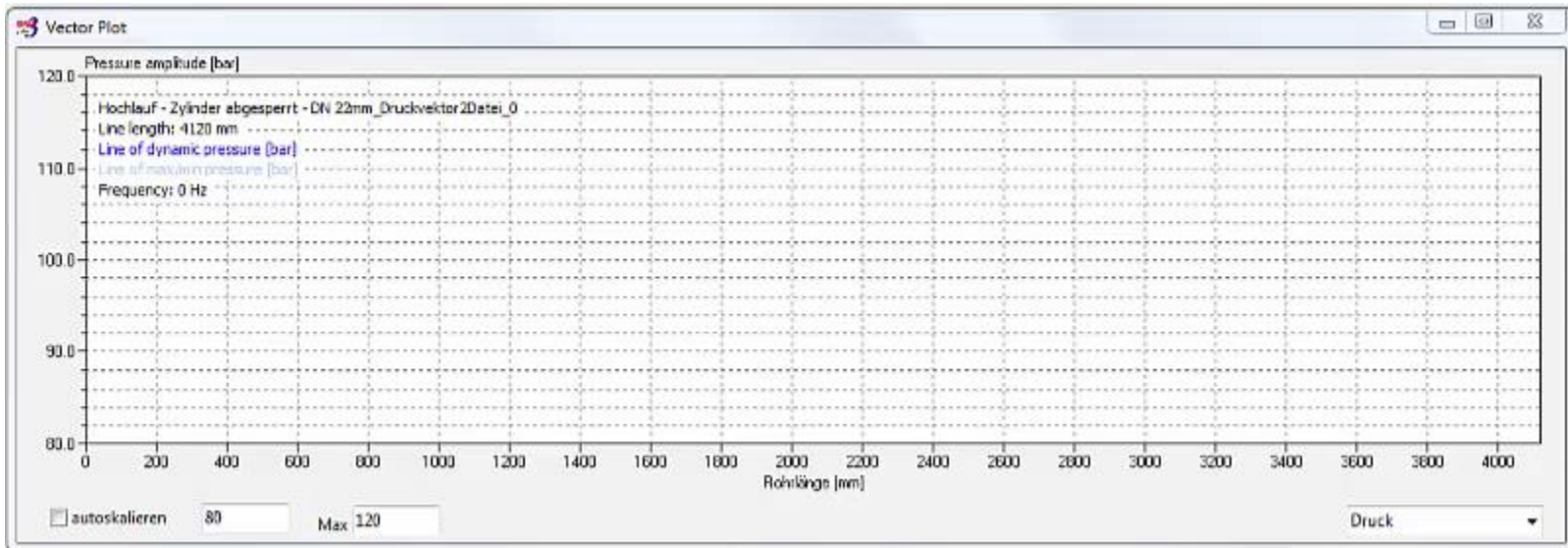
RohrLex analysiert den Beispielantrieb

Simulation eines Pumpenhochlaufs bei abgesperrem Zylinder



- Der Zylinder ist zunächst durch das Ventil abgesperrt

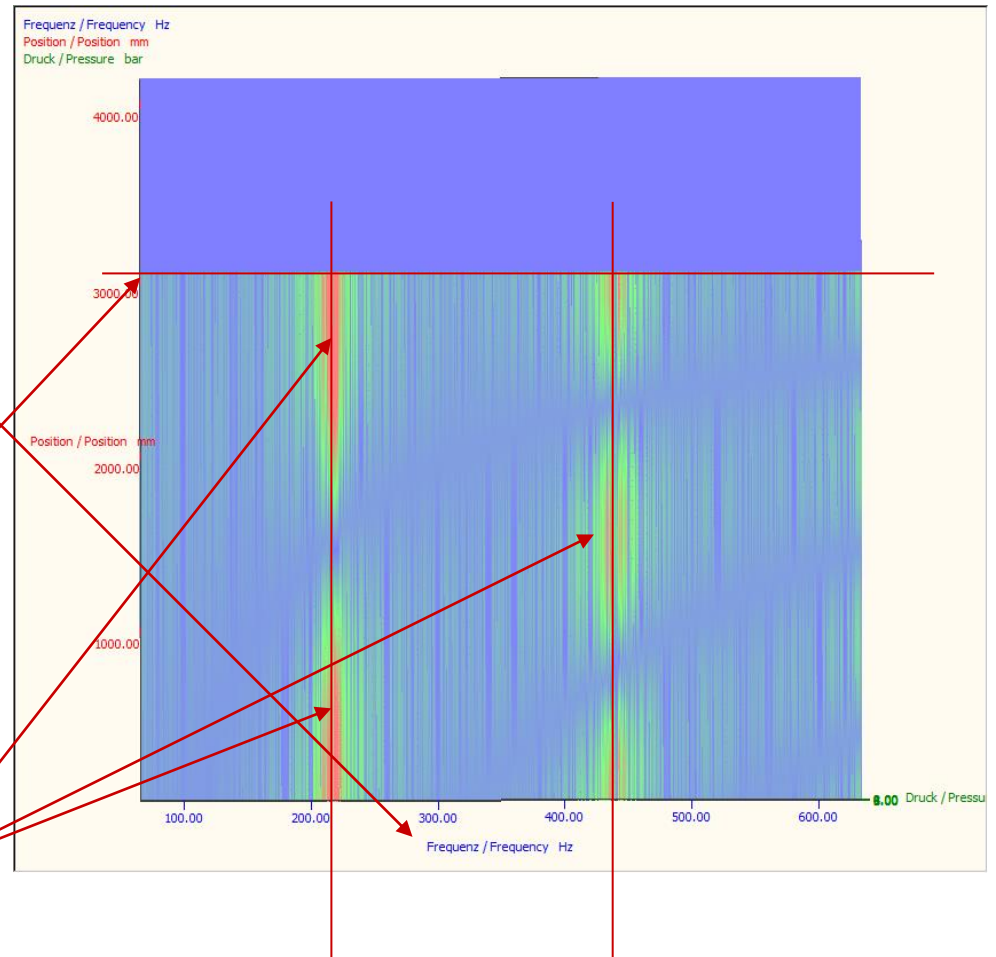
- Das Video zeigt die Druckwerte entlang der Mittellinie der Leitung



RohrLEx analysiert den Beispielantrieb

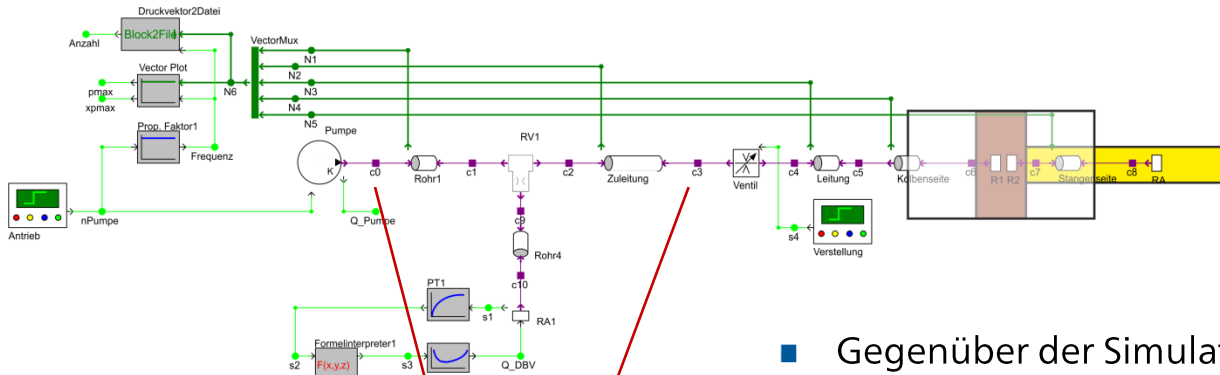
Simulation eines Pumpenhochlaufs bei abgesperrem Zylinder

- Während des Simulationslaufs wurden alle 50 ms die Druckwerte entlang der Mittellinie der Leitung in eine Datei geschrieben.
- Da die Anregungsfrequenz synchron mit der Simulationszeit ansteigt, können in der Grafik die Druckwerte über der Frequenz dargestellt werden.
- Die y-Achse zeigt die Länge des Systems. Gut zu erkennen ist die Position des Absperrventils bei 3 m.
- Sowohl die erste (218 Hz) als auch die zweite (436 Hz) $\lambda/2$ -Resonanz der Leitung sind gut zu erkennen. Aus der Darstellung wird außerdem deutlich, an welchen Positionen der Leitung hohe Druckpulsationsamplituden auftreten.



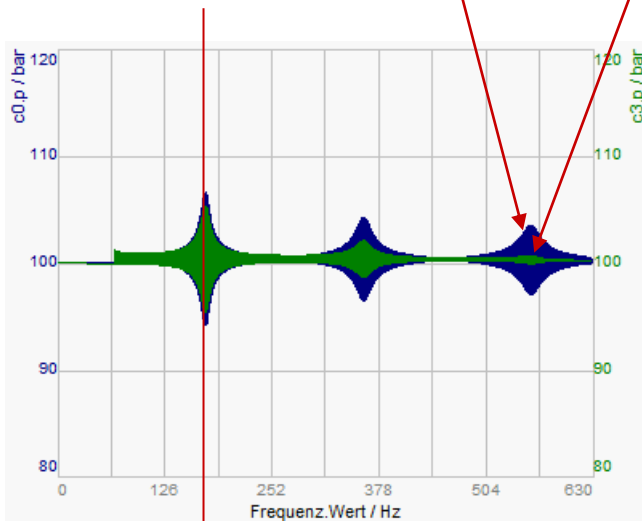
RohrLex analysiert den Beispielantrieb

Simulation eines Pumpenhochlaufs bei zugeschaltetem Zylinder




- Der Zylinder steht bei einem Hub von 10 mm.
- Die Zuleitung zum Zylinder hat eine Länge von 120 mm ($d_i = 22$ mm)

- Gegenüber der Simulation mit abgesperrtem Zylinder hat sich die Resonanzsituation verändert. Die erste Resonanz ist von ≈ 218 Hz auf jetzt ≈ 170 Hz gesunken.
- Die Druckpulsation vor dem Sperrventil ist außerdem deutlich gedämpft.

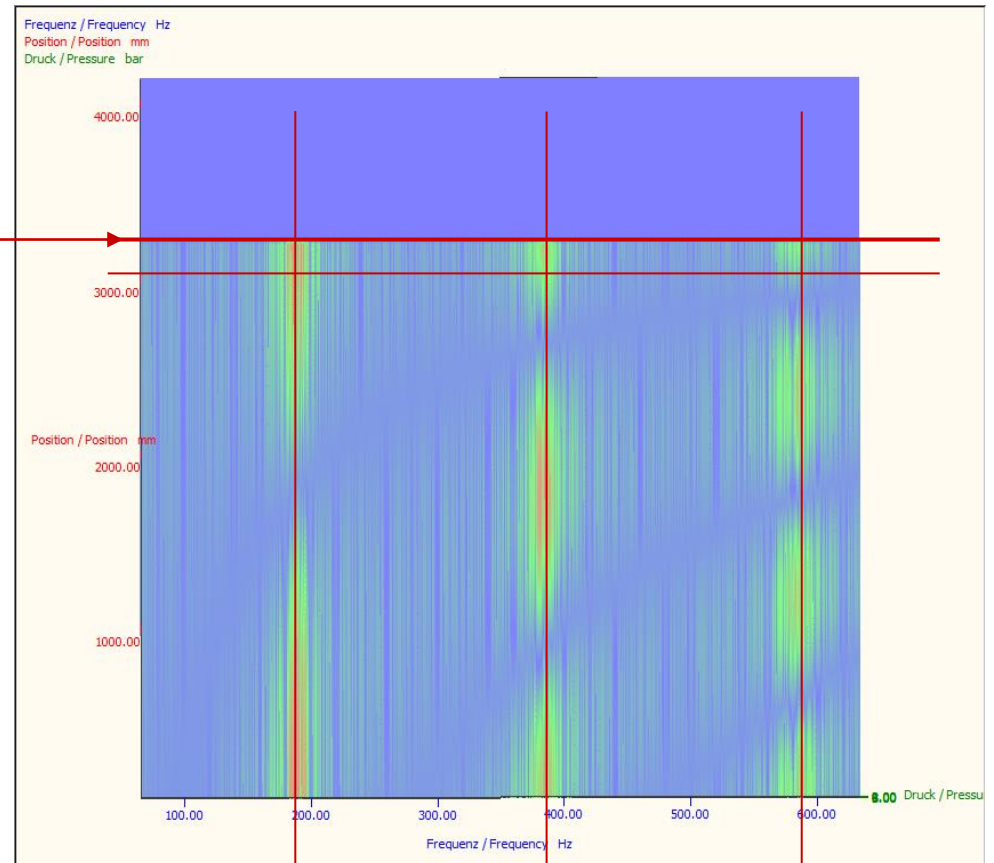


RohrLEx analysiert den Beispielantrieb

Simulation eines Pumpenhochlaufs bei zugeschaltetem Zylinder

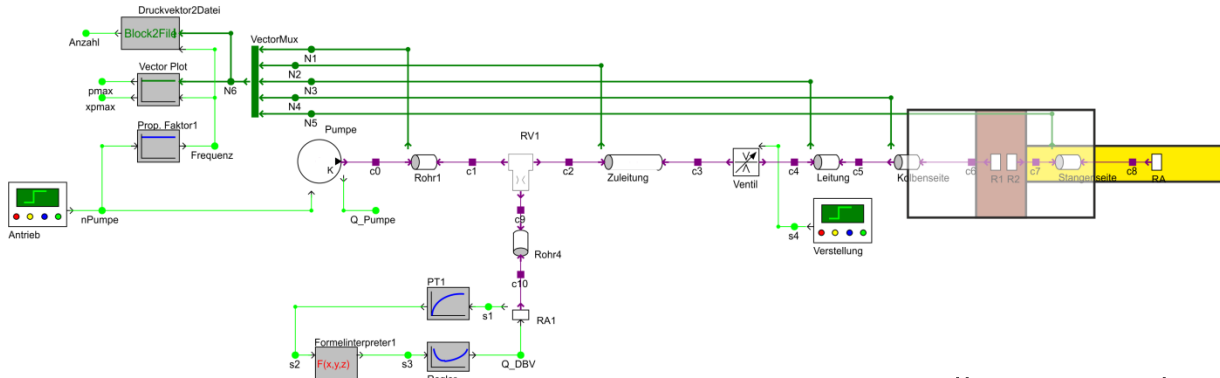
- Es ist offensichtlich, dass jetzt eine etwas andere Resonanzbedingung im System vorliegt.
- Die Druckpulsationen reichen jetzt bis in den Zylinder. 
- Im betrachteten Frequenzbereich sind jetzt die ersten drei Ordnungen der Systemresonanz sichtbar und das Schwingungsbild entspricht nicht mehr exakt dem einer $\lambda/2$ -Resonanz.

- Welchen Anteil der zugeschaltete Zylinder an der Veränderung der Resonanzsituation hat, wird nachfolgend für eine Zylinderposition von 500 mm demonstriert.



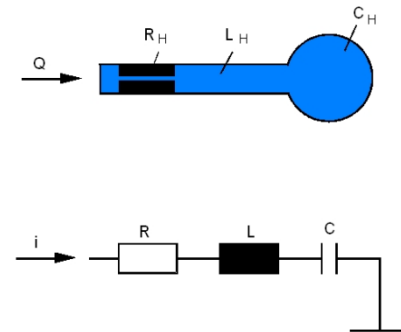
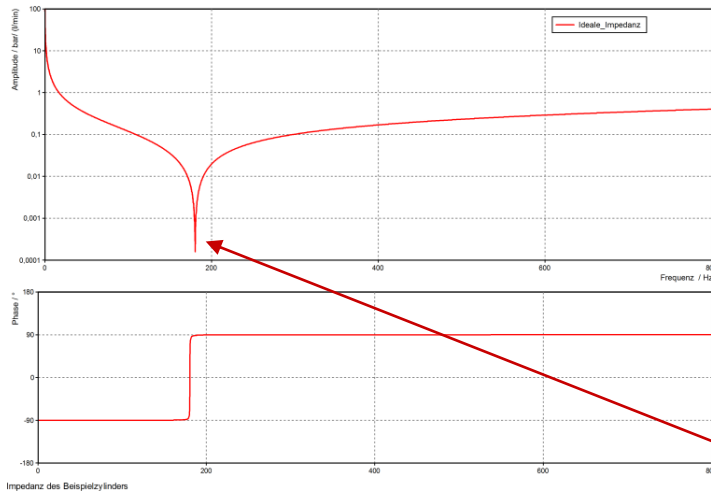
RohrLex analysiert den Beispielantrieb

Simulation eines Pumpenhochlaufs bei zugeschaltetem Zylinder



- Der Zylinder steht bei einem Hub von 500 mm.
- Die Zuleitung zum Zylinder hat eine Länge von 120 mm ($d_i = 22$ mm)

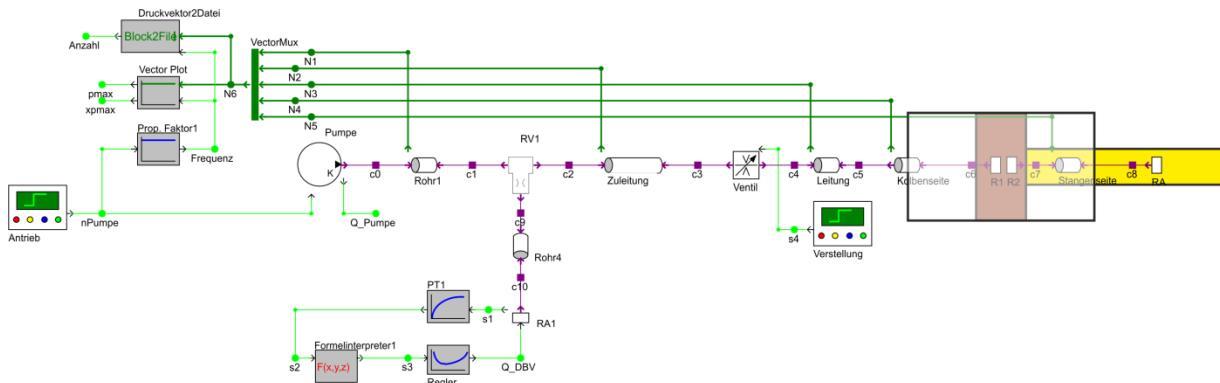
- Das Kolbenraumvolumen des Zylinders, die kurze Leitung und das Absperrventil bilden ein eigenständiges schwingungsfähiges System, das zugeschaltet mit der Rohrleitung interagiert.



- Die Impedanz des Zylinderteilsystems hat eine Tilgerstelle bei 175,6 Hz

RohrLex analysiert den Beispielantrieb

Simulation eines Pumpenhochlaufs bei zugeschaltetem Zylinder



- Der Zylinder steht bei einem Hub von 500 mm.
- Die Zuleitung zum Zylinder hat eine Länge von 120 mm ($d_i = 22$ mm)

- Die Impedanz des Zylinderteilsystems von 175,6 Hz kann mittels Impedanztransformation vereinfacht auch als $\lambda/4$ -Resonanz dargestellt werden. Die virtuelle Resonanzlänge berechnet sich dann zu:

$$l_{virtuell} = \frac{1350 \frac{m}{s}}{4 \cdot 175,6 \frac{1}{s}} \approx 1,92 \text{ m}$$

- Mit dieser virtuellen Leitungslänge kann jetzt überschlägig eine neue $\lambda/2$ Resonanz für das Gesamtsystem berechnet werden:

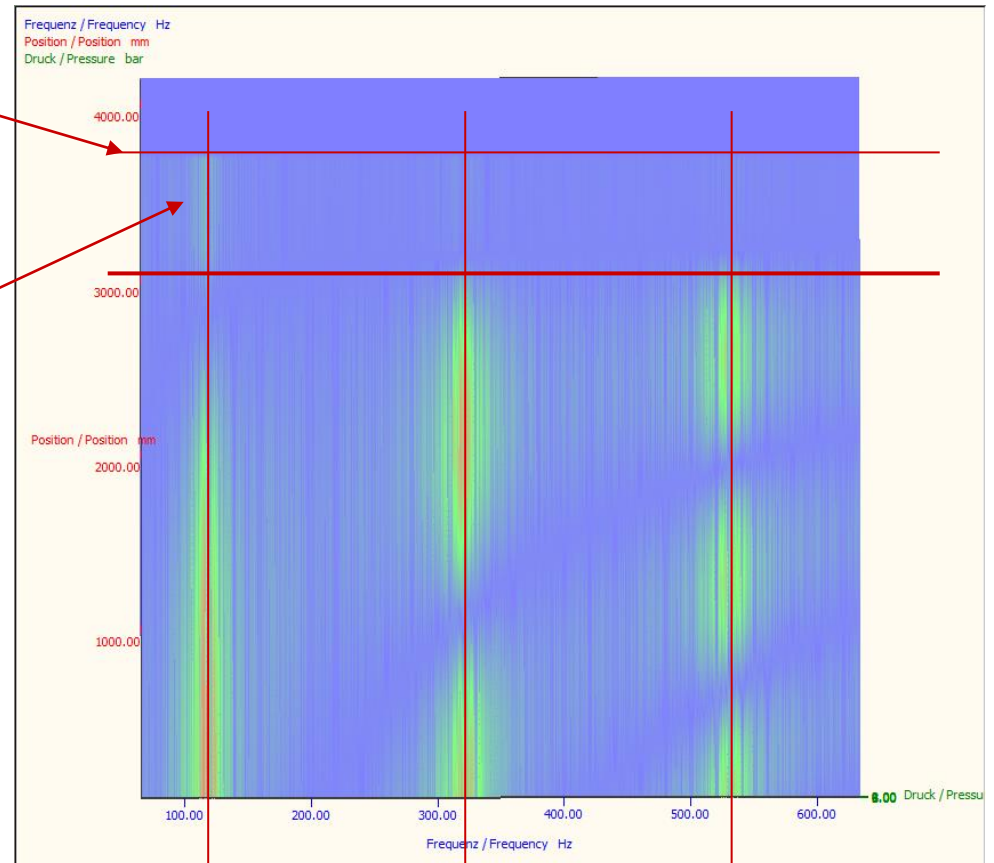
$$f_{\lambda/2 neu.} = \frac{c}{2 \cdot (l + l_{virtuell})} = \frac{1350 \frac{m}{s}}{2 \cdot (3m + 1,92m)} \approx 137,2 \text{ Hz}$$

- Da in dieser Berechnung der Einfluss der frequenzabhängigen Reibung und die dämpfende Wirkung des Kolbenvolumens fehlt, können die 137,2 Hz nur ein erster grober Anhaltswert für die zu erwartende Resonanzfrequenz sein!

RohrLEx analysiert den Beispielantrieb

Simulation eines Pumpenhochlaufs bei zugeschaltetem Zylinder

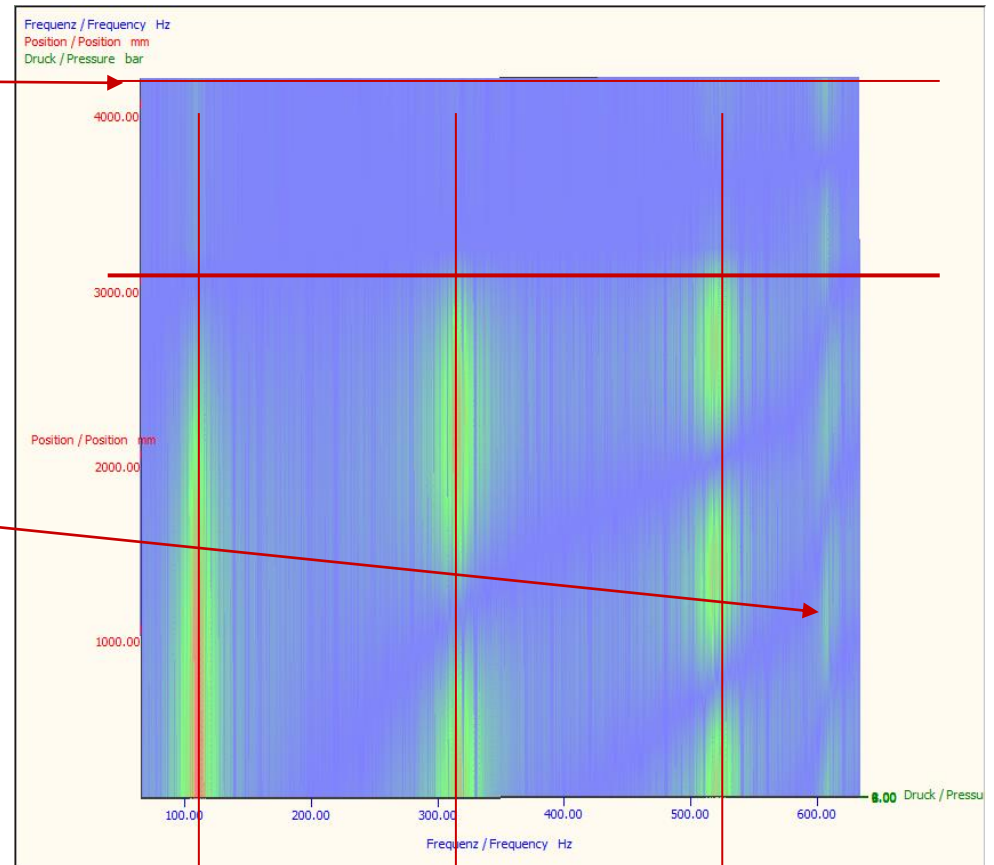
- Die Grafik zeigt die Resonanzsituation für 500 mm Kolbenhub.
- Die frequenzabhängige Reibung ist aktiviert.
- Im Zylinder selbst sind nur leichte Druckpulsationen zu erkennen.
- Die Resonanz liegt mit „nur“ 117 Hz sogar deutlich unterhalb des überschlägig berechneten Wertes.
- Bei der Resonanz kann kaum noch von einer $\lambda/2$ -Resonanz gesprochen werden. Das Schwingungsbild erinnert vielmehr an eine $\lambda/4$ -Resonanz. Mit 117 Hz liegt die Resonanz jetzt auch schon sehr nahe bei dem für eine reibungsfreie $\lambda/4$ -Resonanz berechneten Wert von 112,5 Hz.



RohrLEx analysiert den Beispielantrieb

Simulation eines Pumpenhochlaufs bei zugeschaltetem Zylinder

- Die Grafik zeigt die Resonanzsituation für 990 mm Kolbenhub.
- Die frequenzabhängige Reibung ist aktiviert.
- Die Resonanz liegt mit 110 Hz sehr nahe bei dem für eine reibungsfreie $\lambda/4$ -Resonanz berechneten Wert von 112,5 Hz.
- Bei etwas über 600 Hz ist eine Resonanzerscheinung zu erkennen, die ihr Ursache in der ersten $\lambda/2$ -Resonanz des Zylinderrohrs hat. Hierauf wird an dieser Stelle jedoch aus Zeitgründen nicht weiter eingegangen.



RohrLEx analysiert den Beispielantrieb

Zusammenfassung

- Was hat RohrLEx mit all den bunten Bildern über den Zylinderantrieb mit drehzahlveränderlichem Pumpenantrieb herausgefunden?
- Je nach Drehzahl und verwendeter Pumpe wird das System breitbandig von 0 Hz bis über 600 Hz angeregt.
- Bereits bei kurzer Rohrleitung werden auch höhere Ordnungen der Leitungsresonanz angeregt. Es gibt also mehrere Resonanzsituationen.
- Die Dimension und vor allem die Position des Zylinders haben Einfluss darauf, welche Resonanzbedingung sich im System einstellt. Dies bedeutet, dass sich die Resonanzbedingungen während des Arbeitshubes des Zylinders kontinuierlich ändern.
- Wird jetzt noch in einer Druck- oder Geschwindigkeitsregelung die Drehzahl der Pumpe variiert, so ist es sehr schwer vorauszusagen, ob es im System zu einem Druckschwingungsproblem kommt.
- Einfache Handrechnungen können die Resonanzbedingung des Antriebs nur unzureichend vorhersagen.



Übersicht

- 1 RohrLEx entdeckt die neue DIN EN 50598-2
- 2 Warum RohrLEx sich auf die DIN EN 50598-2 freut
- 3 RohrLEx präsentiert einen Beispielantrieb
- 4 RohrLEx analysiert den Beispielantrieb
- 5 RohrLEx verrät Tipps und Tricks
- 6 RohrLEx fasst zusammen



RohrLEx verrät Tipps und Tricks

Warum zur Abwechslung nicht mal vorher simulieren?

- RohrLEx hat gezeigt, dass Druckschwingungsprobleme bei Systemen mit drehzahlveränderlichem Antrieb mittels Simulation deutlich einfacher zu untersuchen sind.
- Was liegt also näher, als die Simulation bereits zu Projektbeginn als unterstützendes Werkzeug einzusetzen?
- Eigentlich spricht hier nichts dagegen, zumal die benötigten Simulationsmodelle, wie das vorherige Beispiel gezeigt hat, gar nicht so kompliziert sein müssen.
- Oftmals sind es „nur“ schlicht Bequemlichkeit, die Unkenntnis der Möglichkeiten der Simulation oder ein diffuses Unbehagen gegenüber der Simulation, die den Einsatz der Simulation verhindern.
- Aber muss man die Simulation denn unbedingt selber machen?



RohrLex verrät Tipps und Tricks

Warum zur Abwechslung nicht mal vorher simulieren?

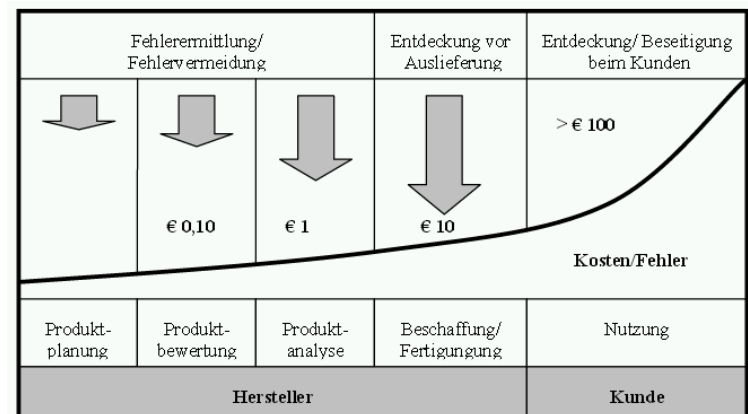
- RohrLex ist der Meinung, dass sich im Bedarfsfall immer ein Engineering-Partner bzw. Simulationsdienstleister findet, der hilfreich zur Seite springt.
- Dass diese Hilfestellung nicht nur im Problemfall die Rettung ist, sondern auch für „Standardprojekte“ sinnvoll ist, zeigt ein kurzer Exkurs in die methodische Qualitätssicherung.
- Die meisten Ingenieure sind sicherlich schon einmal mit dem Begriff FMEA konfrontiert worden, oder?
- Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (englisch: **F**ailure **M**ode and **E**ffects **A**nalysis) ist eine Methode, die sich mit der Erkennung und Behandlung von potenziellen Fehlern beschäftigt.



RohrLex verrät Tipps und Tricks

Warum zur Abwechslung nicht mal vorher simulieren?

- Im Rahmen des Qualitätsmanagements wird die FMEA verwendet, um das entstehende Risiko des Auftretens von Fehlern zu minimieren. Dabei werden potenzielle Fehler in Systemen, Konstruktionen und Prozessen analysiert und Maßnahmen definiert, um diese so früh wie möglich zu entdecken.
- Der Zusammenhang zwischen den Kosten für die Beseitigung von Fehlern und dem Zeitpunkt der Entdeckung ist in der Abbildung dargestellt. Die Zehnerregel besagt, dass sich die Kosten von einem Prozessschritt zum nächsten verzehnfachen.
- Aus diesem Grund folgt die FMEA der Idee einer präventiven Fehlerverhütung anstelle einer nachträglichen Erkennung bzw. Korrektur.



Die Zehnerregel
der Fehlerkosten

Quelle: Harald Panhofer – FMEA Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
<http://home.intergga.ch/neo/downloads/fmea.pdf>

RohrLex verrät Tipps und Tricks

Warum zur Abwechslung nicht mal vorher simulieren?

- Zur Erreichung dieser Zielsetzung ist es sinnvoll, geeignete Maßnahmen bereits in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses einzusetzen.
- Keine Angst: RohrLex stürzt sich jetzt nicht in die Tiefen einer detaillierten FMEA. RohrLex möchte jedoch darauf hinweisen, dass es auch eine „System-FMEA“ gibt.
- Die System-FMEA (auch S-FMEA) untersucht das Zusammenwirken von Teilsystemen in einem übergeordneten Systemverbund bzw. das Zusammenwirken mehrerer Komponenten in einem komplexen System. Sie zielt auf die Identifikation potenzieller Schwachstellen, insbesondere auch an den Schnittstellen, die durch das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten oder die Interaktion des eigenen Systems mit der Umwelt entstehen könnten.
- Die Betrachtung beinhaltet zufällige und systematische Fehler während des Betriebes.

	Fehlerfolge	Fehlerart	Fehlerursache
System-FMEA	Motor startet nicht	Anlasser defekt	Ankerwelle gebrochen
Konstruktions-FMEA	Anlasser defekt	Ankerwelle gebrochen	Zu hohe Pressung/ Einschnürung der Welle
Prozess-FMEA	Ankerwelle gebrochen	Zu hohe Pressung/ Einschnürung der Welle	Fertigungstoleranzen, Fügeart, etc.

Zusammenhang von FMEA-Arten

Quelle: Harald Panhofer – FMEA Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
<http://home.intergga.ch/neo/downloads/fmea.pdf>

RohrLEx verrät Tipps und Tricks

Warum zur Abwechslung nicht mal vorher simulieren?

- Die Betrachtungen auf Systemebene werden in den frühen Phasen der Produktentwicklung durchgeführt, um innerhalb der Produktkonzeption mögliche Fehler oder Schwachstellen zu identifizieren und das Zusammenwirken der Systemkomponenten zu gewährleisten.
- Die Untersuchungen basieren dabei auf Funktionsdiagrammen, Konzeptentwürfen oder Schaltplänen. Mit Hilfe der System-FMEA wird das Verhalten eines Systems aufgrund möglicher Fehlfunktionen einzelner Systemkomponenten ermittelt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Gewährleistung der Systemsicherheit, der Zuverlässigkeit und der Einhaltung von gesetzlichen Vorschriften.
- FMEA hin oder her: RohrLEx ist der Meinung, dass wir genau das mit der Simulation beabsichtigen!

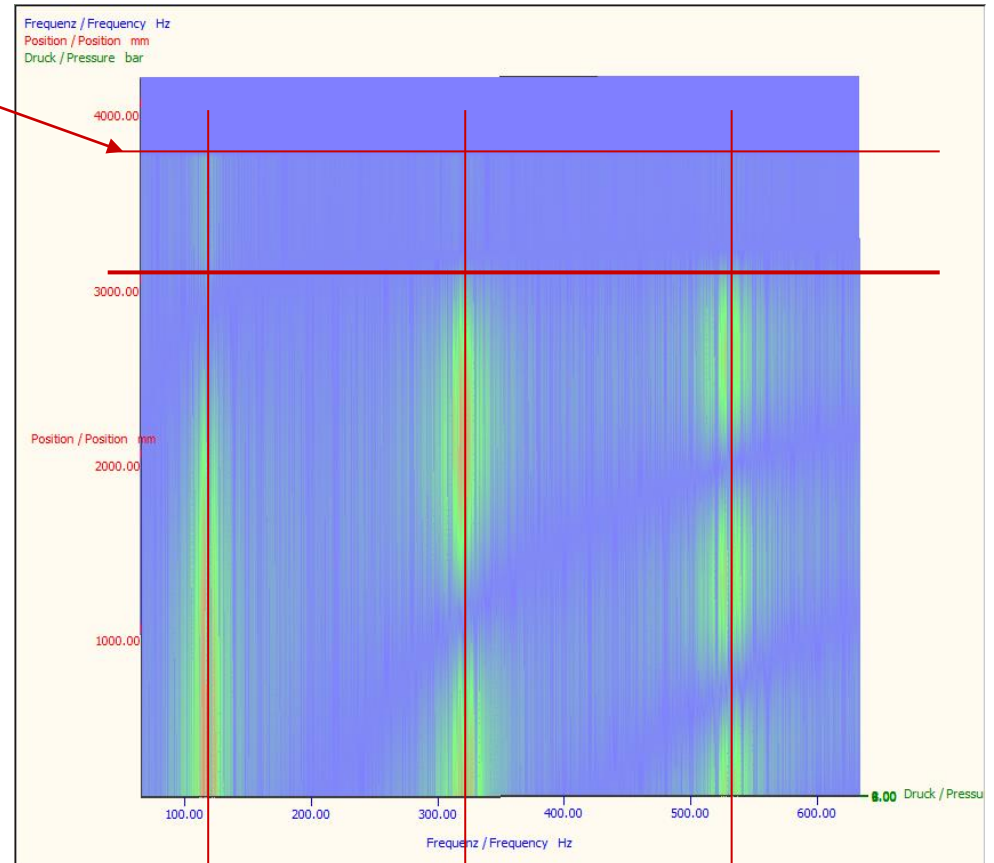


Quelle: Harald Panhofer – FMEA Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
<http://home.intergga.ch/neo/downloads/fmea.pdf>

RohrLEx verrät Tipps und Tricks

Was lässt sich aus den Ergebnissen der Simulation ableiten?

- Am Beispiel der Resonanzsituation für 500 mm Kolbenhub zeigt RohrLEx, welche Informationen zur Leistung des Zylinderantriebs aus den Simulationen gewonnen werden können.
- Die Resonanzen liegen bei 117 Hz, 320 Hz und 540 Hz.
- Was bedeutet dies für die Drehzahl des Beispielantriebs?
- Es gilt: $n_{117\text{Hz}} = \frac{117\text{Hz}}{10} \cdot 60 = 702 \frac{1}{\text{min}}$
 $n_{320\text{Hz}} = 1920 \frac{1}{\text{min}}$
 $n_{540\text{Hz}} = 3240 \frac{1}{\text{min}}$
- Die Frequenzachse könnte also auch als Drehzahlachse umgeschrieben werden.
- Nur ist die Drehzahl der Pumpe für die Bewertung des Zylinderantriebs nicht die interessanteste Größe.



RohrLex verrät Tipps und Tricks

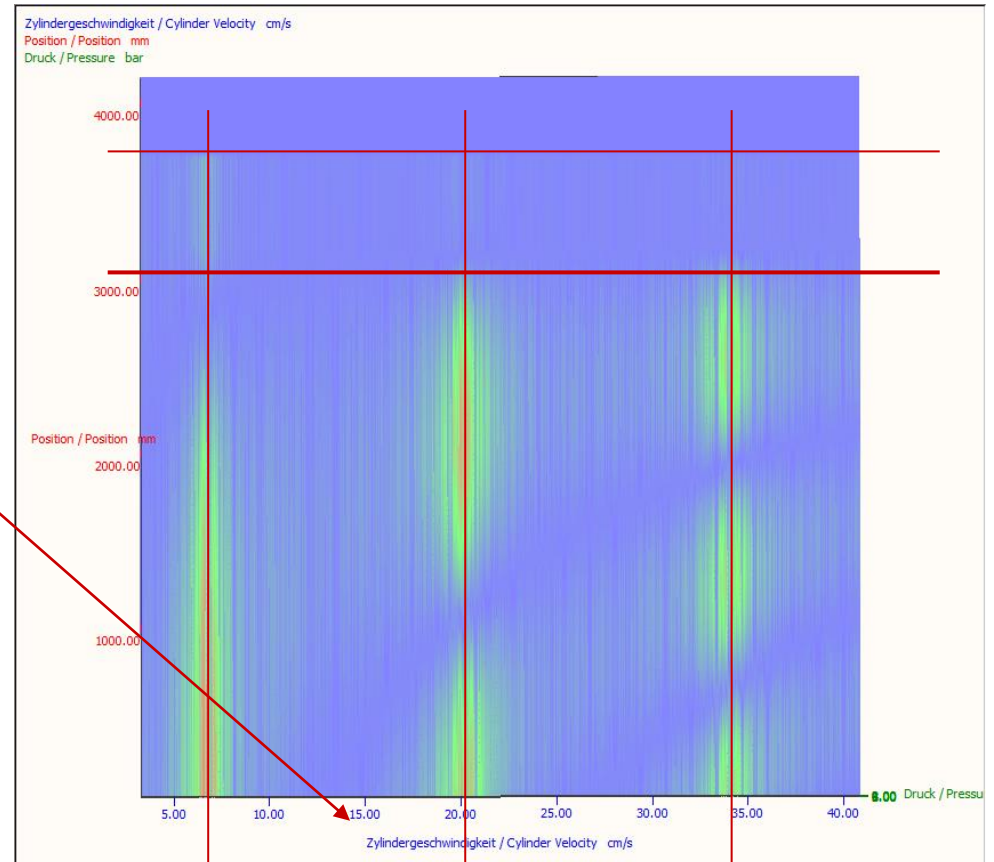
Was lässt sich aus den Ergebnissen der Simulation ableiten?

- Aber aus Drehzahl und Fördervolumen kann der Volumenstrom der Pumpe berechnet werden und mit diesem schließlich die Zylindergerwindigkeit.

- Es gilt:

$$v_{Zyl} = \frac{V_g}{z \cdot A_{Zyl}} \cdot f$$

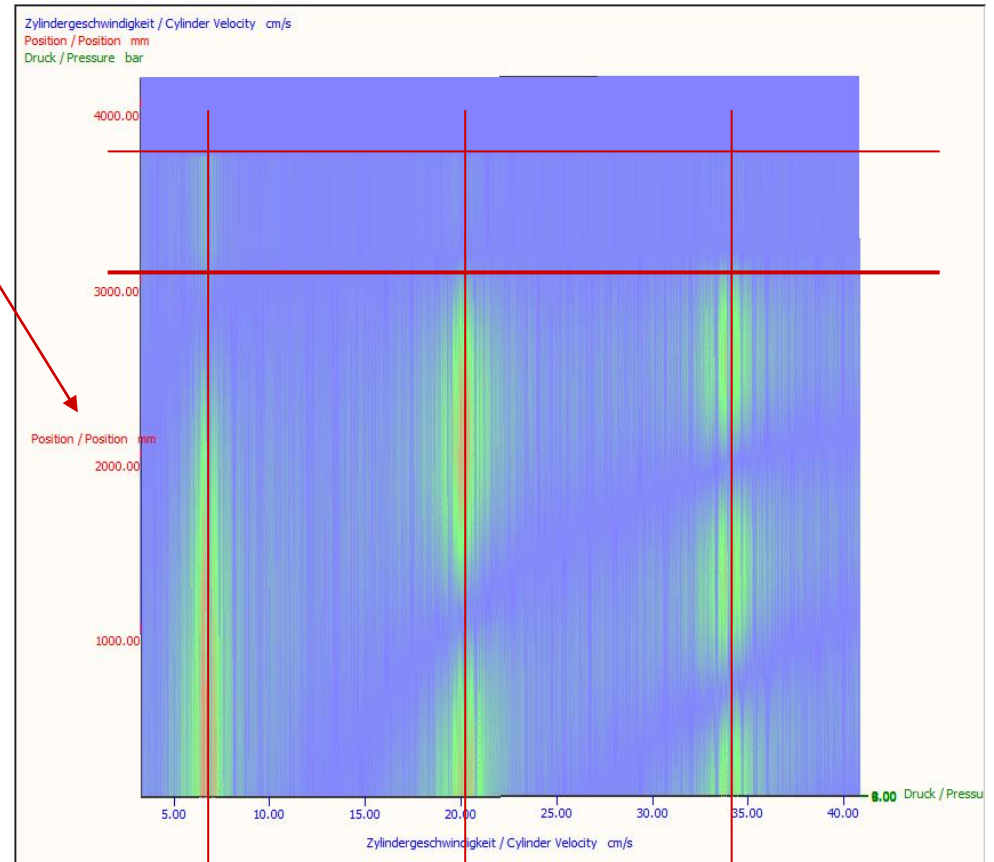
- Mit dieser Gleichung kann die x-Achse der Grafik umgeschrieben werden.
- Auf den ersten Blick wird jetzt deutlich, dass im Beispielsystem eine Zylindergerwindigkeit von $7,5 \text{ cm/s}$ genau die erste Resonanz bei 117 Hz und eine Zylindergerwindigkeit von 20 cm/s die zweite Resonanz anregen würde.
- Die Steuerung des Zylinders könnte jetzt z. B. direkt so programmiert werden, dass eine Zylindergerwindigkeit von ca. 20 cm/s vermieden wird.



RohrLEx verrät Tipps und Tricks

Was lässt sich aus den Ergebnissen der Simulation ableiten?

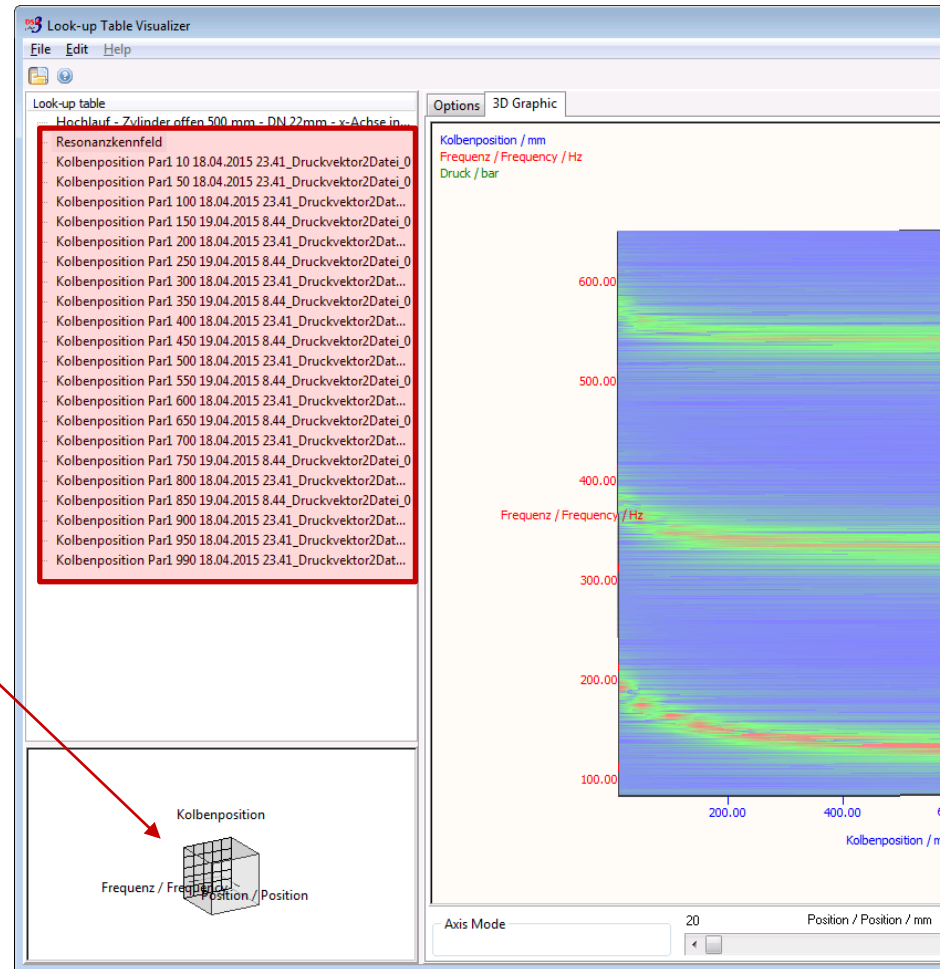
- Aus der Grafik ist auch ersichtlich, an welchen Leitungspositionen die höchsten Druckpulsationen zu erwarten sind. Diese Information ist hilfreich für die Positionierung von Sensoren oder Befestigungspunkten.
- Leider gilt diese Betrachtung aber „nur“ für 500 mm Zylinderhub.
- RohrLEx hat jedoch gezeigt, dass sich die Resonanzsituation hubabhängig ändert.
- Was hier hilft, ist die Visualisierung der Veränderung der Resonanzsituation über den gesamten Hubbereich des Zylinders.



RohrLex verrät Tipps und Tricks

Was lässt sich aus den Ergebnissen der Simulation ableiten?

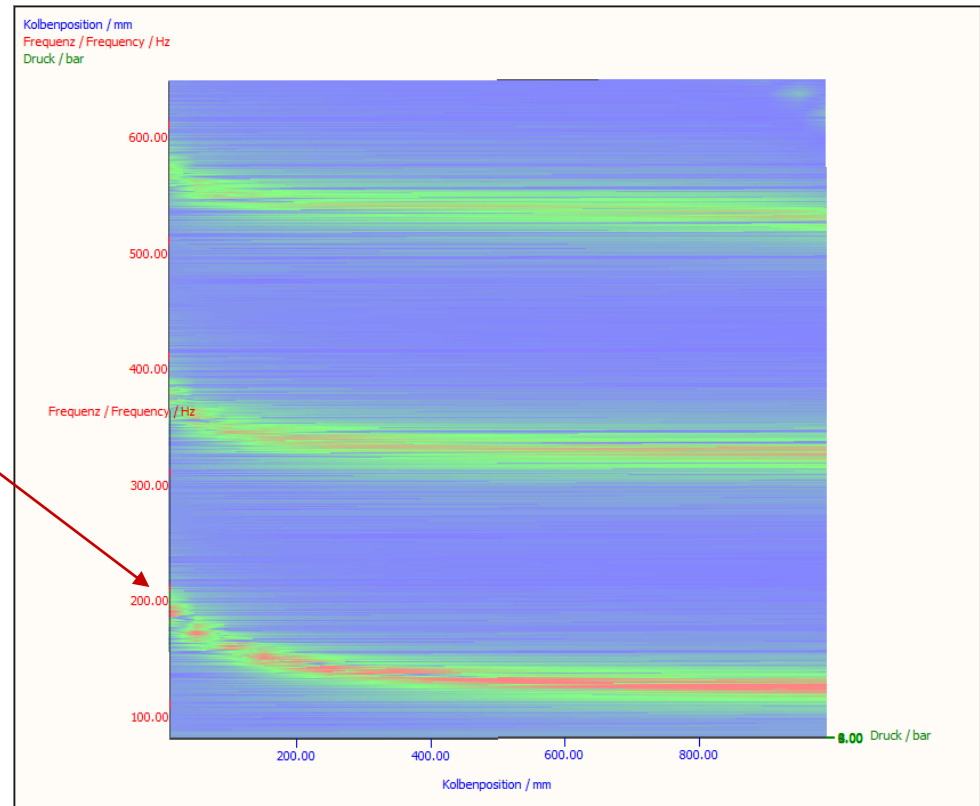
- RohrLex hat hierzu eine automatische Seriensimulation durchgeführt und die Ergebnisse zu einem Resonanzkennfeld zusammen gefasst.
- Das Kennfeld zeigt die Druckpulsation des Zylinderantriebs in Abhängigkeit der Frequenz (oder wahlweise der Zylindergerwindigkeit), der Kolbenposition und der Position der Leitung.
- Zwei Achsen des Kennfelds sind immer fixiert, die dritte Achse wird mit Hilfe eines Schiebereglers verstellt.
- Zur Analyse der Druckschwungungssituation kann somit jede Leitungsposition oder jede Kolbenposition visualisiert werden.



RohrLEx verrät Tipps und Tricks

Was lässt sich aus den Ergebnissen der Simulation ableiten?

- Die Grafik zeigt exemplarisch die zylinderhubabhängige Veränderung der Druckpulsation direkt am Pumpenflansch.
- Es ist gut zu erkennen, dass sich die Druckpulsation und somit die Resonanzsituation im Zylinderantrieb bei weit eingefahrenem Kolben stark ändert.
- Hier ist bei der Projektierung wieder zu prüfen, wie oft der Zylinder in dieser Position ist und welche Geschwindigkeiten und somit Anregungsfrequenzen dort auftreten.
- Um die Druckschwingungsanalyse zu komplettieren würde RohrLEx die gezeigten Analysen auch noch für die Druckregelung ergänzen.



Übersicht

- 1 RohrLEx entdeckt die neue DIN EN 50598-2
- 2 Warum RohrLEx sich auf die DIN EN 50598-2 freut
- 3 RohrLEx präsentiert einen Beispielantrieb
- 4 RohrLEx analysiert den Beispielantrieb
- 5 RohrLEx verrät Tipps und Tricks
- 6 RohrLEx fasst zusammen



RohrLEx fasst zusammen

- RohrLEx hat bemerkt, dass als Reaktion auf die neue Norm DIN EN 50598-2 verstärkt drehzahlvariable Pumpenantriebe propagiert werden. Die Systeme werden sowohl für Druck- und Volumenstromregelung als auch für Kraft- und Geschwindigkeitsregelung sowie für Positions- oder Leistungsregelung angepriesen.
- RohrLEx konnte zeigen, dass, unabhängig von den unbestrittenen energetischen Vorteilen, diese Antriebe aber leider auch eine systemimmanente höhere Anfälligkeit für Druckschwingungsprobleme haben.
- RohrLEx konnte aber auch zeigen, dass sich diese potenziellen Probleme durch den methodischen Einsatz von Simulation bereits in der Projektierung des Antriebs identifizieren und somit frühzeitig adressieren lassen.
- RohrLEx ist in diesem Zusammenhang gerne bereit, all denen, die es wünschen, unterstützend zur Seite zu stehen.



