



Digitaler Tagungsband zur Veranstaltung
am 11. und 12. Januar 2023 in Weimar

I/4 Nomogramme zur Ermittlung von Kavitations-Druckstößen in Leitungssystemen

Dr.-Ing. Heiko Baum

Kurzfassung

Die Wissenschaft hat die Wirkzusammenhänge von Kavitations-Druckstößen in Leitungssystemen intensiv untersucht. Entwickler verfügen heute über validierte numerische Verfahren zur Berechnung der Druckstöße. Die Anwendung dieser Berechnungsverfahren im Rahmen der Leitungssystemauslegung ist allerdings noch ausbaufähig.

Was fehlt, sind praxistaugliche Arbeitsabläufe, die die Druckstoßberechnung selbstverständlicher in den Arbeitsalltag der Entwickler einbinden. Eine automatisierte a priori Berechnung zahlreicher Lastfälle gepaart mit der Konsolidierung der Berechnungsergebnisse zu leicht verständlichen Nomogrammen ist eine Maßnahme, die den Entwickler im Arbeitsalltag unterstützt.

Dieser Beitrag präsentiert einen automatisierten Arbeitsablauf zur Berechnung von Kavitations-Druckstößen auch für komplexere Leitungssysteme. Das zugrundeliegende Simulationsmodell sowie dessen Integration in den automatisierten Arbeitsablauf wird vorgestellt. Eine kurze Diskussion der Berechnungsergebnisse rundet den Beitrag ab.

1. Einleitung

Wahrscheinlich ist das Phänomen der Druckstöße in Leitungssystemen Ingenieuren bekannt, seitdem es gelungen ist, Flüssigkeiten durch geschlossene Leitungssysteme zu leiten. TEMPORELLI und DE NOVELLIS beschreiben in ihrer Veröffentlichung „Hydraulic engineering of inverted siphons in Roman age - a review“ [1], dass bereits die alten Römer praktische Erfahrung im Umgang mit unerwünschten Druckstößen in Leitungssystemen hatten. Heutzutage stehen zahlreiche Publikationen zur Verfügung, die numerische Modelle präsentieren, die zur Berechnung von Druckstößen geeignet sind. Eine umfassende Übersicht hierzu präsentieren BERGANT, SIMPSON, und TIJSELING in ihrer Veröffentlichung “Water hammer with column separation: A historical review” [2]. Überprüft werden die numerischen Modelle in der Regel durch Messaufbauten an geraden Rohrleitungen, sodass die Berechnungsergebnisse auch mit der theoretischen Berechnung nach JOUKOWSKY [3] verglichen werden können. Von der theoretischen bzw. wissenschaftlichen Seite aus sind die Voraussetzungen, die numerische Druckstoßberechnung als entwicklungsbegleitendes Werkzeug einzusetzen, somit gegeben.

Leider sieht der standardmäßige Einsatz der Druckstoßberechnung in der industriellen Praxis noch anders aus. WALTERS und LEISHEAR [4] fassen den heutige Status Quo wie folgt zusammen: „Die Industrie ist häufig mit der Planung komplizierter Rohrleitungssysteme betraut, die manchmal viele Kilometer lang sind. Darüber hinaus stehen die Ingenieure in der Industrie in der Regel unter Budget- und Zeitdruck und müssen oft Entscheidungen mit manchmal unvollständigen und unvollkommenen Informationen treffen. Daher verlassen sich Ingenieure in der Industrie in vielen Fällen auf schnelle, handbuchmäßige Formeln, um Entscheidungen auf der Grundlage von Schätzungen zu treffen.“

Diese „pragmatische“ Vorgehensweise birgt nicht zu unterschätzende Gefahren für die druckstoßfeste Auslegung des Leitungssystems. WALTERS und LEISHEAR zeigen an einfachen Beispielen, dass es in Leitungssystemen aufgrund von Verzweigungen, durch Durchmessersprünge oder Materialwechsel oder durch den Zusammenbruch des Kavitationsgebietes zu Druckstoßamplituden kommen kann, die deutlich höher sind als die vereinfachte Abschätzung des Druckstoßes mit der Berechnung nach JOUKOWSKY. Verursacht werden diese hohen Druckamplituden durch die Überlagerung (Interferenz) von Druckwellen, die sich nach einem initialen Druckstoß im Leitungssystem ausbreiten. Die Berechnung der resultierenden Amplitudenhöhe und die Position des höchsten Druckstoßes im Leitungssystem sind dann nur noch mit numerischen Methoden möglich, was von den Autoren auch dringend empfohlen wird.

Die Notwendigkeit zum Einsatz der Druckstoßberechnung ist also bereits mehr als ausreichend adressiert. Was jedoch noch fehlt, sind praxistaugliche Arbeitsabläufe, durch die die Technik auch für Entwickler nutzbar wird, die wenig Zeit zum Aufbau der benötigten Simulationsmodelle haben. Eine automatisierte a priori Berechnung zahlreicher Lastfälle gepaart mit der anschließenden Konsolidierung der Berechnungsergebnisse zu leicht verständlichen Nomogrammen wäre eine Maßnahme, die Druckstoßberechnung selbstverständlicher in den Arbeitsalltag der Entwickler einzubinden.

Dieser Beitrag präsentiert einen hierfür geeigneten Arbeitsablauf. Im nachfolgenden Abschnitt wird zunächst das Simulationsmodell vorgestellt, das der Berechnung der Kavitations-Druckstoßen zugrunde liegt. Anschließend wird dessen Integration in einen automatisierten Simulationsworkflow beschrieben und die Berechnungsergebnisse diskutiert.

2. Kavitations-Druckstöße in Leitungssystemen

Ein häufig in der Literatur zu findendes Validierungsexperiment für numerische Modelle zur Druckstoßberechnung wurde von BERGANT und SIMPSON [5] publiziert. Der Versuchsaufbau ist in **Bild 1** dargestellt. Die in Bild 1 enthaltenen Anmerkungen beschreiben Randbedingungen für die nachfolgend vorgestellten Simulationsrechnungen.

- Simulated system as per Bergant & Simpson (1999) - „Pipeline column separation flow regimes“
- Simulation time step must be $\leq 2 \cdot 10^{-6}$ s
- Initial situation: flow from **lower to upper reservoir** at 0.3 m/s and 1.4 m/s
- Rapid closure of the valve at Tank 1 at $t = 0.1$ s
- $\alpha_{G0} = 1.5 \cdot 10^{-7}$ (Bergant: 10^{-7})
- All other parameters **exactly match** Bergant's

Quantity	Value	Unit
Pipe length:	37.23	[m]
Pipe diameter:	0.0221	[m]
Thickness of wall pipe:	0.0016	[m]
Pipe slope:	3.2	[°]
Head in Tank 2:	22	[m]
Initial air void fraction:	10^{-7}	[-]
Valve closure time:	0.009	[s]
Wave speed in liquid:	1319	[m/s]

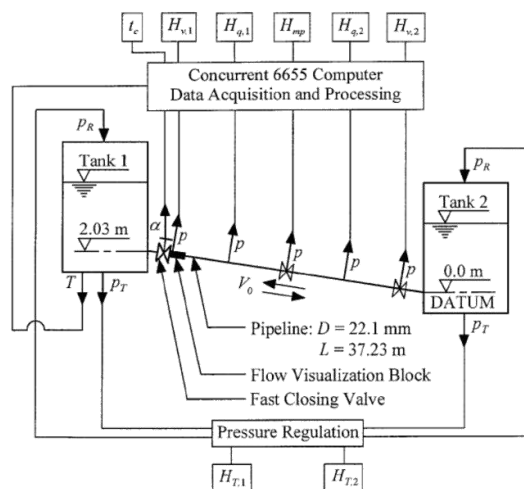


Bild 1: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Druckstößen nach [5]

Der in Bild 1 gezeigte Prüfstands Aufbau ist dazu in der Lage, auch sogenannte „short duration pressure pulses“, also kurzzeitige Druckspitzen, zu erzeugen. Was hierunter zu verstehen ist, ist in **Bild 2** grafisch dargestellt.

- Angus (1935) presented one of the first papers dealing with large short-duration pressure pulses due to the collapse of a cavity in a pipeline.
- A short-duration ($t < 2 \cdot L/a$) **pressure pulse** (Simpson 1986) due to cavity collapse is defined as a delayed step in the pressure-time trace superimposed on a pressure wave as shown in Figure 3.
- Both Simpson (1986) and Bergant (1992) described in detail the sequence of events leading to a short-duration pressure pulse.
- This pulse is the superposition of the cavity-collapse head and the reservoir wave head doubled by its reflection from the closed valve. The resulting maximum head (thick solid line) is **higher than** the maximum head predicted by the **Joukowsky equation** (thin solid line).

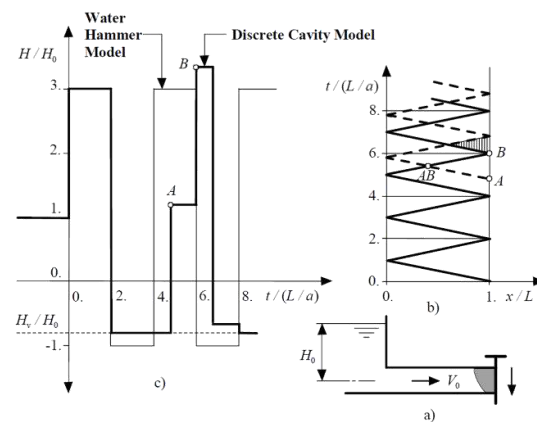


Figure 3 A short-duration pressure pulse. (a) Reservoir-pipe-valve system. (b) Wave paths in distance-time plane. (c) Piezometric head history at valve.

Bild 2: Beschreibung und grafische Aufbereitung von kurzzeitigen Druckspitzen

Bei SIMPSON und WYLIE [6] findet sich zudem eine anschauliche Beschreibung des Entstehens von kurzzeitigen Druckspitzen, die frei übersetzt wie folgt lautet:

„Ein hoher Druck, der durch den Kollaps eines Dampfrohrraums entsteht, wird als kurzzeitige Druckspitze bezeichnet. Die Zeitdauer der Druckspitze bezieht sich auf die Zeitspanne $2L/a$ für die Rohrleitung der Länge L , wobei a die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit ist. Eine Druckspitze von kurzer Dauer, die mit dem Kollaps eines Dampfrohrraums einhergeht, dauert also zwischen 0 und $2L/a$ s. Die Entstehung einer kurzzeitigen Druckspitze kann physikalisch wie folgt erklärt werden. Nach dem schnellen Schließen des Ventils breitet sich eine Druckstoßwelle vom Ventil in Richtung des Reservoirs aus. Diese Welle wird vom Reservoir reflektiert und wandert zurück zum Ventil, wo sie $2L/a$ s nach dem Schließen des Ventils ankommt. Der Druck am Ventil fällt dann unter den anfänglichen stationären Zustand, wodurch ein Dampfrohrraum entsteht, der anschließend wieder zusammenbricht. Der Kollaps des Dampfrohrraums erzeugt zusätzlich zur ursprünglichen Druckstoßwelle eine zweite Druckstoßwelle, die ebenfalls durch das Rohr läuft. Die kurzzeitige Druckspitze tritt auf, wenn die ursprüngliche Druckstoßwelle wieder am Ventil ankommt und es zur Überlagerung mit der zweiten Druckstoßwelle kommt.“

3. Simulation von Kavitations-Druckstößen in Leitungssystemen

Nach dem kurzen theoretischen Exkurs zu den Wirkzusammenhängen bei kurzzeitigen Druckspitzen wird in **Bild 3** ein Simulationsmodell präsentiert, mit dem die Druckimpulse in sehr guter Näherung berechnet werden können.

Zentral in der Mitte befindet sich die eigentliche Leitung, die aus vier Einzelrohrstücken modelliert ist. Jedes Rohr ist intern wiederum entlang der Mittellinie in zahlreiche Elemente unterteilt, an denen lokal der Druck, die Strömungsgeschwindigkeit, die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit und das Kavitationsvolumen berechnet werden. Die internen Zustandsgrößen der Rohre werden zu einem Vektor zusammengefasst und in eine Datei gespeichert, sodass die Dynamik des Druckstoßes im Anschluss an die Simulation analysiert werden kann.

Zusätzlich sind diskrete Messstellen definiert, um die Simulationsergebnisse mit Referenzmessungen vergleichen zu können.

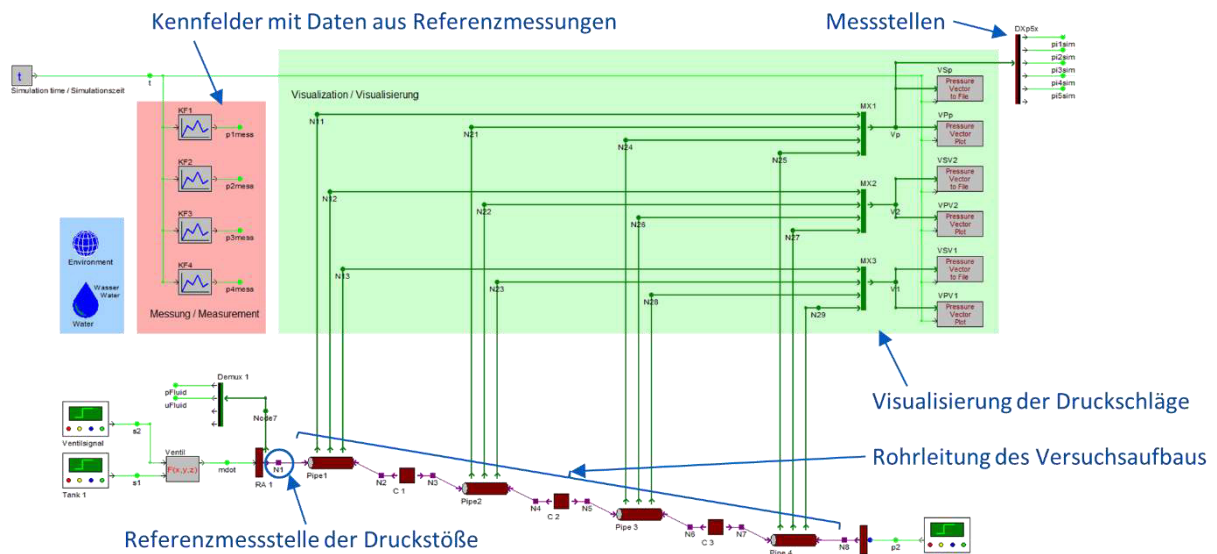


Bild 3: Simulationsmodell zur Druckstoßberechnung

Wichtig für die Simulation von Kavitations-Druckstößen ist, dass das verwendete Rohrleitungsmodell dazu in der Lage ist, neben dem eigentlichen Druckstoß auch noch die „Vorgeschichte“, also die Kavitation bzw. die kavitationsähnlichen Verhältnisse in der Leitung, abzubilden. Eine zu detaillierte Beschreibung des für diese Aufgabenstellung im Simulationsprogramm DSHplus [7] implementierten Rohrleitungsmodells, das auf dem in [8] beschriebenen MOC-Verfahren basiert und wahlweise die in [2] vorgestellten DVCM oder DGCM Verfahren zur Kavitationsberechnung verwendet, würde allerdings den Rahmen dieses Beitrags sprengen.

Bild 4 zeigt das Ergebnis einer Druckstoßsimulation mit kurzzeitigen Druckspitzen. Simuliert ist der in [5] beschriebene Versuch mit 0,3 m/s Strömungsgeschwindigkeit unter Verwendung der DVCM.

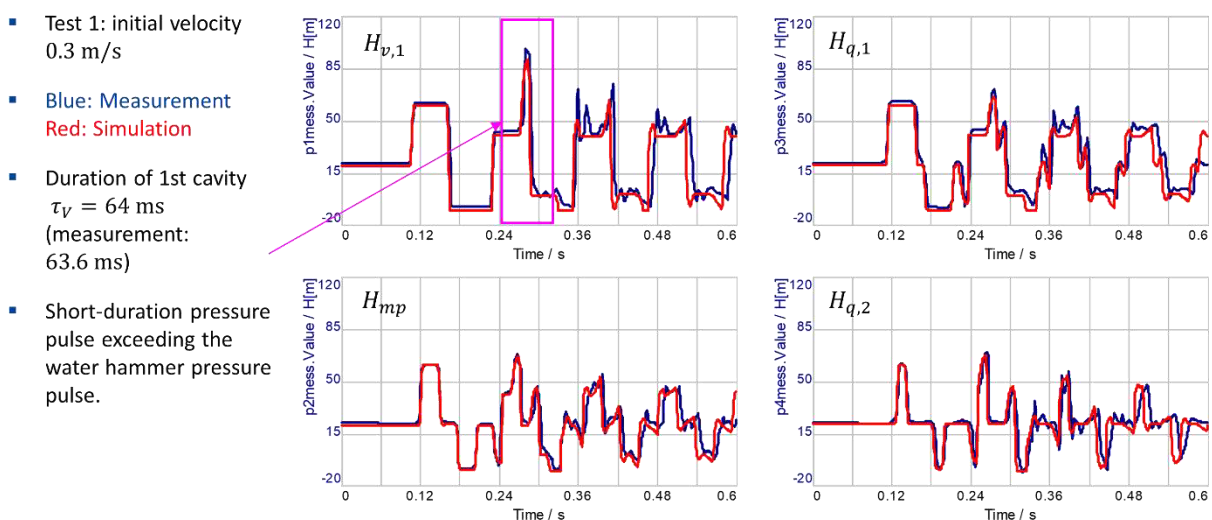


Bild 4: Druckstoßsimulation mit kurzzeitigen Druckspitzen

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den digitalisierten Referenzergebnissen aus [5] bestätigt für alle vier Messstellen, dass das Rohrleitungsmodell den Effekt der kurzzeitigen Druckspitzen sehr gut abbildet.

Im Anschluss an die Druckstoßsimulation stehen nicht nur die Drücke an diskreten Messstellen als Ergebnis zur Verfügung. Wie in der Beschreibung zu Bild 3 erläutert, können zahlreiche rohrinterne Variablen zur Analyse gespeichert werden. **Bild 5** zeigt exemplarisch die Verteilung des Drucks und des Kavitationsvolumens entlang der Rohrleitungsmittelachse (x-Achse der Grafik) über den Simulationszeitraum (y-Achse der Grafik).

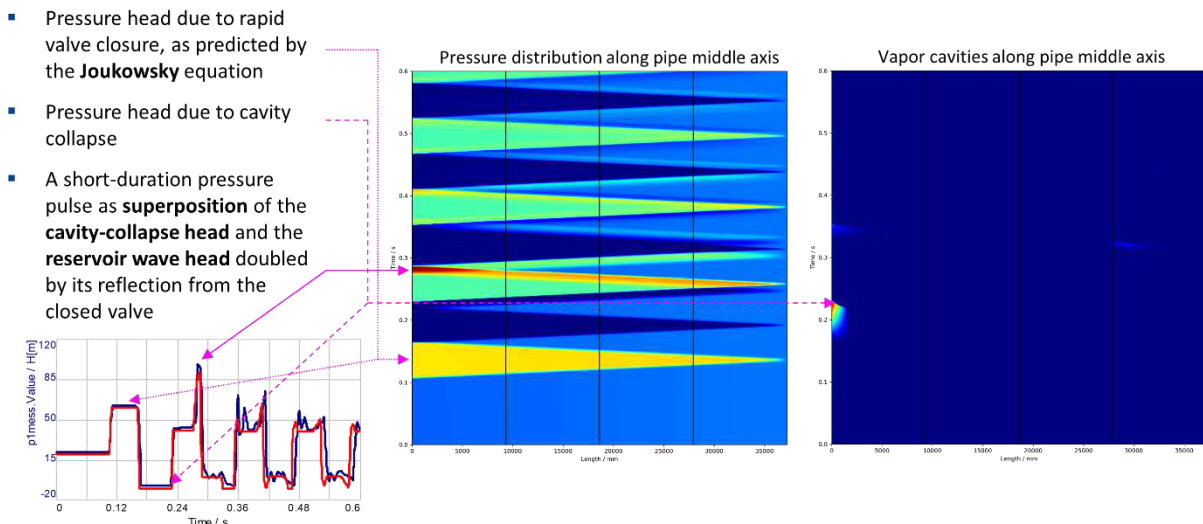


Bild 5: Visualisierung der Druckverteilung und des Kavitationsvolumens entlang der Rohrleitungsmittelachse

Die kurzzeitige Druckspitze aus der Referenzsimulation ist in der linken Grafik gekennzeichnet. In dieser Grafik sind zudem die in Zusammenhang mit Bild 2 beschriebenen zwei Druckstoßwellen zu sehen. Das Kavitationsvolumen, dessen Kollaps für die Entstehung der zweiten Druckstoßwelle verantwortlich ist, ist in der rechten Grafik markiert.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass es möglich ist, numerisch die kurzzeitigen Druckspitzen zu bestimmen, die während eines Druckstoßereignisses entstehen können. Unter welchen Randbedingungen es zu kurzzeitigen Druckspitzen kommt, hängt jedoch von den individuellen Randbedingungen der jeweiligen Rohrleitung ab. Hier zeigen sich jetzt die Vorteile der numerischen Simulation, denn durch eine Parametervariation kann automatisiert ein breites Spektrum möglicher Anlagenkonfigurationen berechnet werden. Es ist somit nicht überraschend, dass sowohl in [5] als auch in [8] Beispiele für Parametervariationen präsentiert werden. Allerdings ist aus den genannten Literaturstellen auch ersichtlich, dass es bereits für die „einfache“ gerade Rohrleitung zahlreiche zu berücksichtigende Einflussfaktoren (Druckverhältnisse, Strömungsgeschwindigkeit, Ventilschließzeit, Rohrleitungsgeometrie) gibt. Sollen z. B. auch noch die Positionen der Leitungsverzweigungen und die Länge der Abzweigung oder etwa Durchmesserwechsel in der Parametervariation berücksichtigt werden, dann explodiert die Anzahl möglicher Simulationen und eine Automatisierung wird erforderlich.

4. Automatisierung der Druckstoßsimulation mit dem Virtual Engineering Lab

Basis der automatisierten Simulation bildet das schon bekannte Simulationsmodell aus Bild 3, das um Elemente zur Parametervorgabe und um einen Datenexport erweitert wird (**Bild 6**). Zum Aufbau des Simulations-Workflows wird das fertige Modell aus dem Simulationsprogramm exportiert und in das Virtual Engineering Lab (VEL) von FLUIDON geladen. Das VEL ist ein flexibles, plattform- und produktoffenes und individuell konfigurierbares Werkzeug zur Orchestrierung von Simulations-Workflows. Für nähere Information zum VEL sei auf [9] verwiesen.

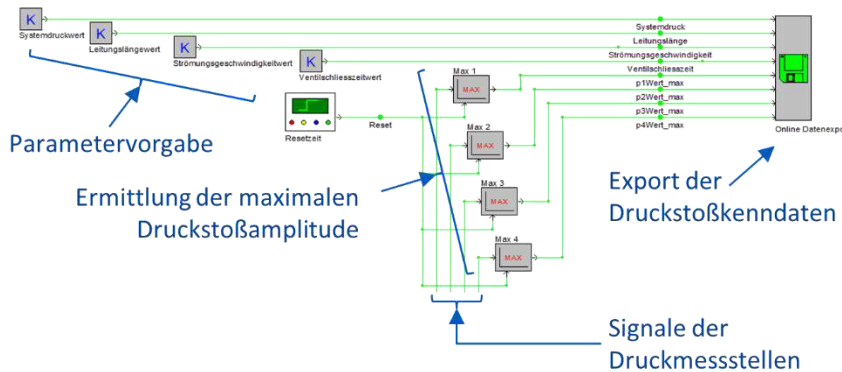


Bild 6: Elemente zur Parametervorgabe und zum Export der Druckstoßkenndaten

Um nicht direkt mit einem zu komplexen Beispiel für die automatisierte Druckstoßsimulation zu starten, wird zunächst eine Parametervariation des Versuchsaufbaus aus Bild 1 präsentiert. Die Leitungsgeometrie bleibt konstant, variiert werden die Strömungsgeschwindigkeit in 21 Schritten von 0,05 m/s bis 2,05 m/s und der Systemdruck in Tank 1 in 61 Schritten von 15 H [m] bis 30 H [m]. In den Berechnungsergebnissen sind somit auch die aus [5] bekannten Referenzergebnisse enthalten.

Bild 7 zeigt die Ansicht des für die Parametervariation zuständigen Python-Skripts im VEL. Im Skript dienen die Zeilen 31 bis 33 zur Eingabe des zu variiierenden Parameterbereichs. Das Skript erzeugt aus den Vorgaben in Zeile 39 einen VOLLFAKTORIELLEN VERSUCHSPLAN [10] mit 1.281 Parametersätzen und speichert diese direkt im Verzeichnis des Simulationsmodells, das jetzt mit der Berechnung beginnt. Das VEL-Plugin für die Simulationsrechnung berechnet parallel die voneinander unabhängigen Parametersätze, wodurch die volle Leistung der Rechnerhardware ausgenutzt wird.

Die detaillierten Ergebnisse der 1.281 Simulationen sind für den Entwickler zunächst von untergeordnetem Interesse. Primär möchte er durch die Parametervariation erfahren, mit welchen maximalen Druckstoßamplituden er innerhalb der definierten Randbedingungen rechnen muss. Als Bewertungskriterium dient die in Bild 3 markierte Referenzmessstelle. Die Extraktion der Druckwerte aus den Simulationsergebnissen übernimmt wiederum ein Python-Skript (**Bild 8**).

Im linken Teil des Skripts sind die Eingaben zu sehen, die festlegen, in welcher Formatierung die selektierten Ergebnisse als Pivot-Tabelle ausgegeben werden. Der rechte Teil zeigt einen Teilausschnitt der Pivot-Tabelle, die zur Weiterverarbeitung auch als Microsoft-Excel-Datei gespeichert wird.

```

14 import fileop.filelist as filelist
15
16 ## assign the project name, from which results should be loaded
17 sourceProjectName = "parameter_variation"
18 ## assign the project name, to which results should be stored
19 targetProjectName = "simulation_model"
20 ## assign the template file for parameter sets
21 templateFile = "template.txt"
22 ## assign the name of reference look-up table file
23 kenFile = "template.ken.txt"
24 ## comment to be added before each parameter set
25 comment = "run1"
26
27 ## assignment in template
28 #konstante2.wert [par1] 0.001 mm Paraml.Value ;
29
30 ## changes as an array
31 par1 = np.arange(37.23, 37.5, 0.23) # Leitungslaenge
32 par2 = np.arange(1.5, 30.1, 0.25) # Druck in Task 3
33 par3 = np.arange(0.1, 2.1, 0.1) #Stromungsgeschwindigkeit
34
35 # build the DOE data frame
36 # - Script -----
37 t0 = time.time()
38 print("%f s: % (time.time() - t0) + 'build the DOE data frame'"
39 df = build_full_fact([par1, par2, par3])
40 print(df)
41 shape = df.shape
42
43 # - Script -----
44 # - Manage directories -----
45 # - Start up directory of the script
46 originalPath = os.getcwd()
47 if (originalPath[-1] != '/'):
48     originalPath = originalPath + '/'
49 # print("%f s: % (time.time() - t0) + originalPath"
50
51 # - source directory
52 sourcePathName = ".\\..\\..\\..\\sourceProjectName + '\\workspace\\results'"

```

Bild 7: Python-Skript zur Parametervariation mit vollfaktoriellem Versuchsplan

```

1 # ...
2 Script to generate spectrogram plots
3 # ...
4
5 ## assign the project name, from which results should be loaded
6 sourceProjectName = "consolidate_data"
7 ## assign the project name, to which results should be stored
8 targetProjectName = "pivot_table"
9 ## assign logo file
10 logoName = "fluidon_rgb.png"
11 ## Name of the combined file which user wants to save all the data in
12 mergeDataFileName = "consolidateData"
13 ## Name of the index whose zero values are to be deleted
14 deleteZeroIndexName = "time"
15 ## Matrix with row names, pivot table will be created in that order
16 rowName = ["Systemdruck", "Leitungslaenge"]
17 rowUnit = ["[m]", "m"]
18 rowUnitFactor = ["0.010", "1"]
19 ## Name of column data
20 columnName = ["Stromungsgeschwindigkeit"]
21 columnUnit = ["m/s"]
22 columnUnitFactor = ["1"]
23 ## Value to be sorted in pivot table
24 sortValueName = ["p1_max"]
25 sortValueUnit = ["[m]"]
26 sortValueUnitFactor = ["0.010", "1"]
27 ## Aggregate function in case there are more than one values for same inputs
28 aggFunc = "max"
29
30 import time
31 import os
32 import matplotlib.pyplot as plt
33 import numpy as np
34 from mpl_toolkits.axes_grid1 import make_axes_locatable, axes_size
35
36 from pptx import Presentation
37 from pptx.util import Pt
38
39 import fileop.filelist as filelist
40 import fileop.createPivotTable as pivotTableSkpt
41
42 # - Script -----

```

Bild 8: Python-Skript zur Pivot-Analyse

Bild 9 präsentiert die Zusammenfassung der 1.281 berechneten Druckstoßamplituden.

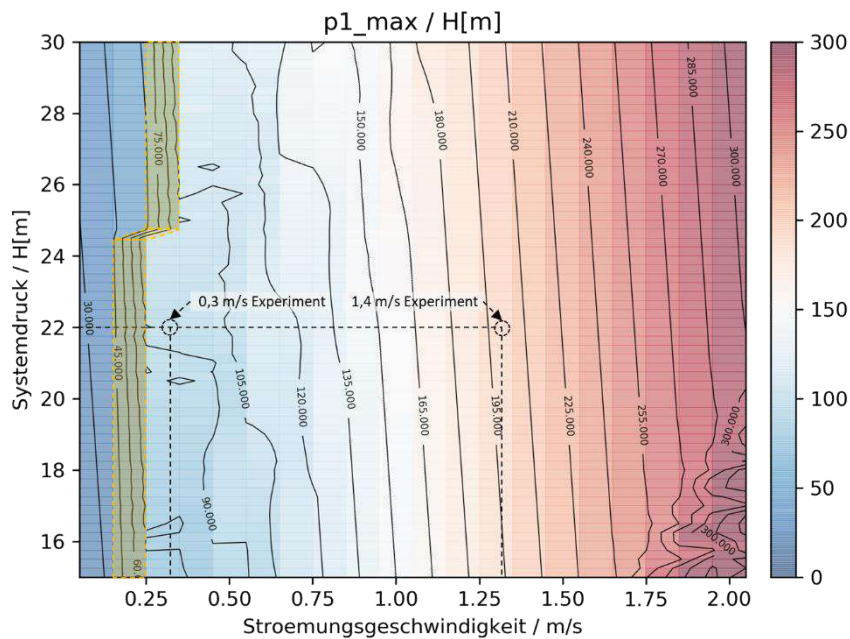


Bild 9: Ergebnisgrafik mit den Druckstoßamplituden an der Referenzmessstelle „p1“

Durch die farbliche Kennzeichnung in Kombination mit den Höhenlinien ist direkt zu erkennen, welche Randbedingungen höhere und welche niedrigere Druckstoßamplituden verursachen. Die beiden Referenzergebnisse mit 0,3 m/s und 1,4 m/s Strömungsgeschwindigkeit aus [5] sind in Bild 9 durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. Für beide Betriebspunkte liegen die berechneten maximalen Druckstoßamplituden im Bereich der publizierten Werte.

In Bild 9 ist auch zu erkennen (gelb markiert), dass es bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit, aber steigendem Systemdruck in Tank 1 zu einer Veränderung des Druckstoßverhaltens kommt. Im Systemdruckbereich von 15 H [m] bis 25 H [m] kommt es bei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,2 m/s und 0,25 m/s zu einer deutlichen Erhöhung der maximalen Druckstoßamplituden, was ein Indikator für das Entstehen kurzzeitiger Druckspitzen in diesem Betriebspunktbereich ist. Wird der Systemdruck über 25 H [m] angehoben, so verschiebt sich der Anstieg der maximalen Druckstoßamplitude hin zu Strömungsgeschwindigkeiten von 0,25 m/s bis 0,3 m/s. Bei Strömungsgeschwindigkeiten unterhalb von 0,25 m/s entstehen jetzt keine kurzzeitigen Druckspitzen mehr. Die automatisierte Druckstoßsimulation ist somit in der Lage, die in [6] beschriebene und dort durch Messungen belegte Abhängigkeit der kurzzeitigen Druckspitzen von der Strömungsgeschwindigkeit nachzustellen.

5. Detailanalyse der Ergebnisse

Selbstverständlich muss der Entwickler an dieser Stelle genauer auf die Simulationsergebnisse schauen, um die Interpretation der Ergebnisse aus Bild 9 abzusichern.

Bild 10 zeigt das Dashboard des VELs mit Offline-Scopes zur Datenvisualisierung.

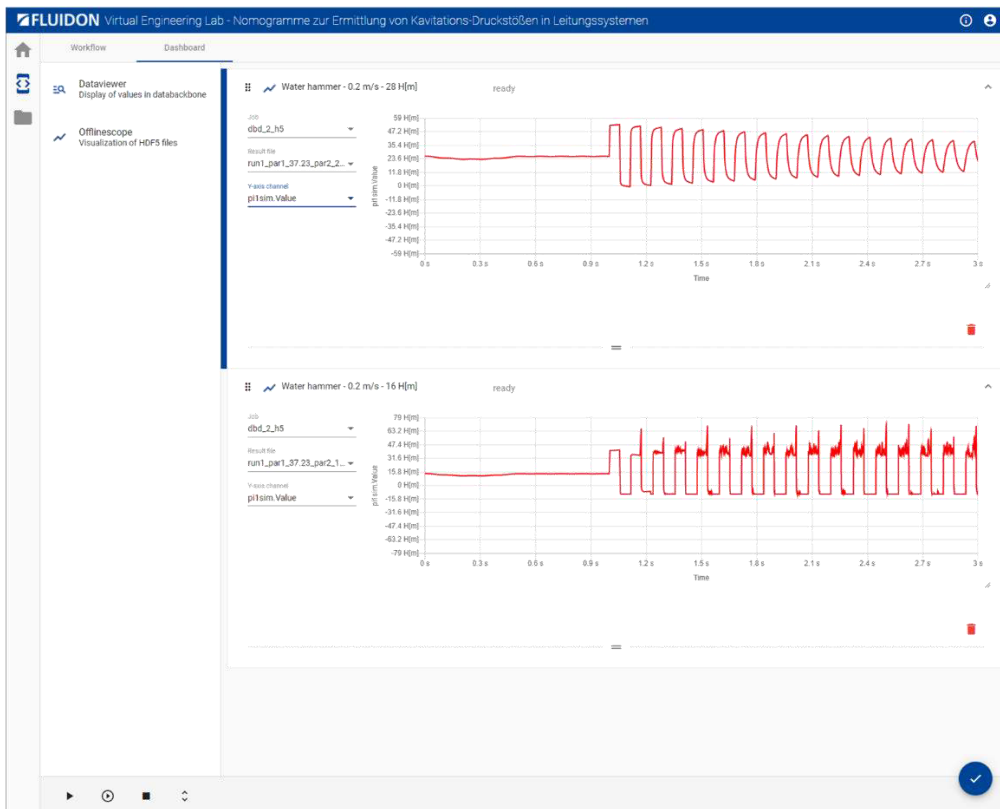


Bild 10: Online-Ansicht der Berechnungsergebnisse
(Achtung, die Online-Scopes verwenden Autoskalierung)

Exemplarisch angezeigt werden hier die Berechnungsergebnisse für eine konstante Strömungsgeschwindigkeit bei zwei unterschiedlichen Systemdrücken. Die Systemdrücke 16 H [m] und 28 H [m] sind als Randbedingung der Simulation durch die Parametervariation voreingestellt. In der ersten Phase der Simulation wird zunächst die Flüssigkeitssäule der Rohrleitung innerhalb von 0,5 s auf die gewünschte Strömungsgeschwindigkeit von 0,2 m/s beschleunigt. Nach einer Ausschwingphase von weiteren 0,5 s wird dann bei 1 s Simulationszeit der Druckstoß ausgelöst.

Wie bereits bei der Interpretation von Bild 9 vermutet, zeigen sich bei der Simulation mit 16 H [m] Systemdruck kurzzeitige Druckspitzen. In der Simulation mit 28 H [m] Systemdruck sind die kurzzeitigen Druckspitzen hingegen wieder verschwunden und das Drucksignal entspricht einem Druckstoßereignis ohne Kavitation, wie es z. B. in [11] publiziert ist.

Zur Dokumentation der Ergebnisse (**Bild 11**) wird der Workflow um ein weiteres Skript ergänzt.

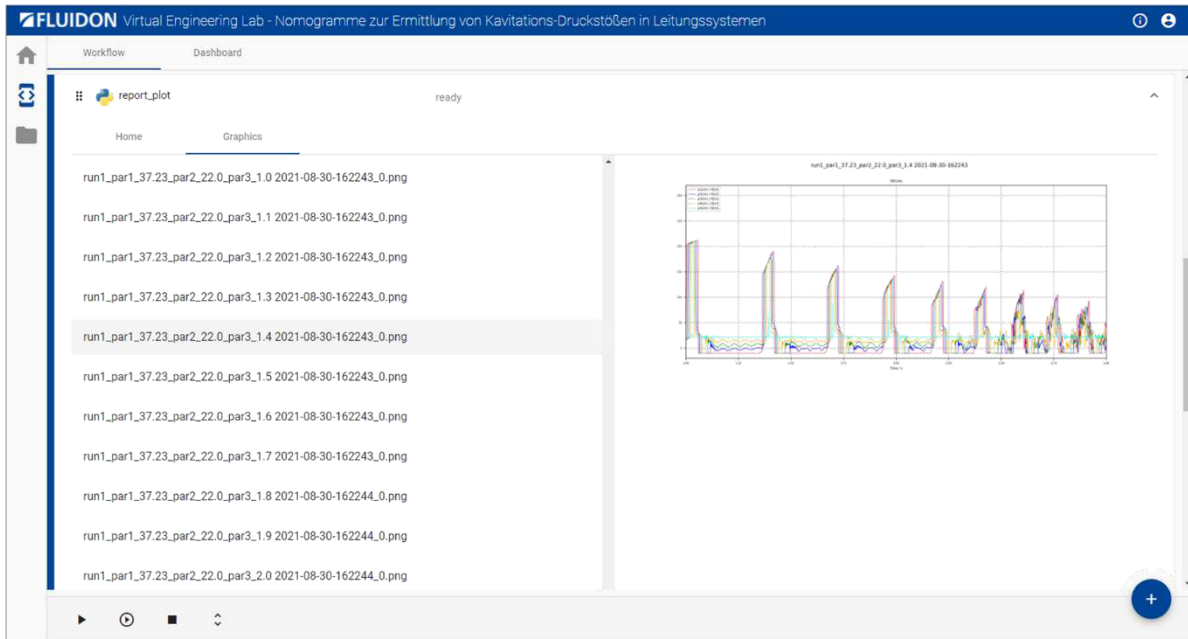


Bild 11: Python-Skript zur Kurvendarstellung und Reporterzeugung

Bild 11 zeigt einen Reportplot mit dem Ergebnis der Simulation bei 1,4 m/s Strömungsgeschwindigkeit und 22 H [m] Systemdruck in Tank 1. In den Zeitsignalen der Drücke ist sichtbar, dass es im Leitungssystem zur Ausbildung eines großen Kavitationsvolumens kommt, was durch die Messungen aus [5] bestätigt wird. Für ergänzende Informationen zur Modellvalidierung sei an dieser Stelle noch auf [12] verwiesen.

6. Druckstoßsimulation mit komplexer Leitungsgeometrie

In den allermeisten Fällen besteht das Leitungssystem nicht nur aus einer einzelnen und dazu noch homogenen Rohrleitung. Reale Leitungssysteme haben Verzweigungen und es sind Änderungen des Rohrdurchmessers, des Rohrmaterials, der Rohrwandstärke oder der Reibungskoeffizienten zu berücksichtigen. Um zu zeigen, dass die automatisierte Druckstoßberechnung auch für diese Einsatzfälle geeignet ist, wird das Simulationsmodell aus Bild 3 um eine Stichleitung erweitert (**Bild 12**).

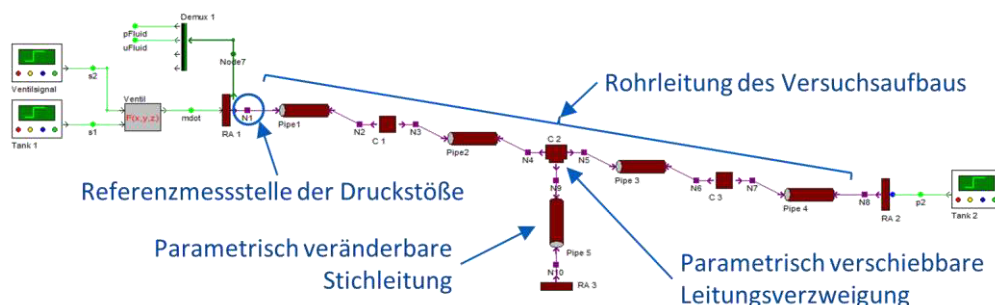


Bild 12: Simulationsmodell zur Druckstoßberechnung mit Stichleitung

Während der Parametervariation wird die Position der Leitungsverzweigung in 31 Schritten um ± 15 m aus der in Bild 12 gezeigten Mittelposition verschoben. Die Gesamtlänge der Rohrleitung bleibt hierbei durch die Längen Anpassung der restlichen Rohre konstant und entspricht für alle Variantensimulationen der in Bild 1 definierten 37,23 m Leitung des Versuchsaufbaus aus [5]. Die Länge der Stichleitung wird in 21 Schritten von 0,1 m bis 20,1 m variiert. Hieraus ergeben sich $31 \cdot 21 = 651$ Kombinationen, die anschließend im Workflow für die Strömungsgeschwindigkeiten 0,3 m/s und 1,4 m/s berechnet werden.

Bild 13 präsentiert das konsolidierte Ergebnis der Variantensimulation für die Druckstoßanalyse mit 0,3 m/s Strömungsgeschwindigkeit und 22 H [m] Systemdruck in Tank 1. Dargestellt ist analog zu Bild 9 die maximale Druckstoßamplitude an der Messstelle „p1“. Die Variationsrechnung mit der Leitungsverzweigung bei 0 m und einer Stichleitungslänge von 0 m entspricht der Simulation der Referenzmessung aus Bild 4.

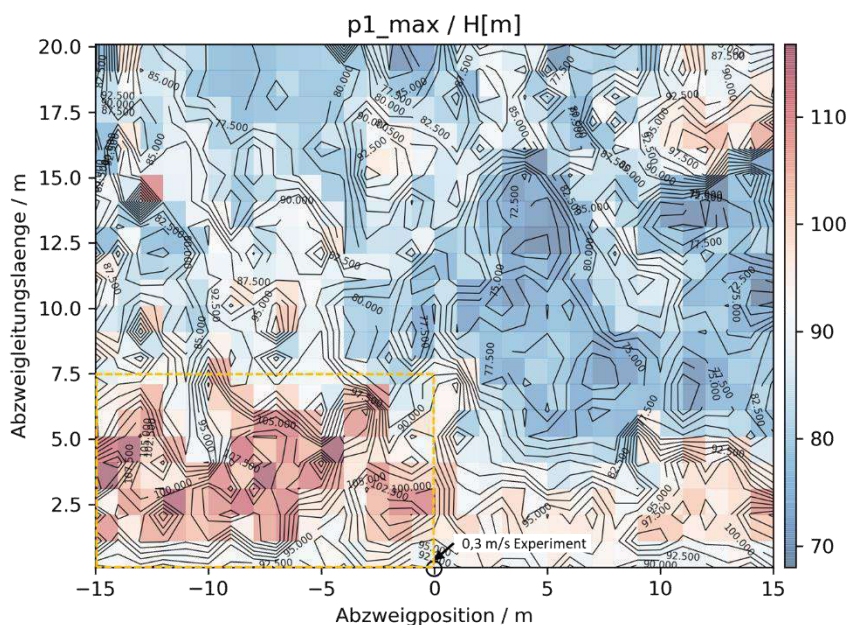


Bild 13: Druckstoßanalyse für 0,3 m/s Strömungsgeschwindigkeit und 22 H[m] Systemdruck in Tank 1

Durch die variabel positionierte Stichleitung hat sich die Komplexität der Rohrleitung hinsichtlich Druckwelleninterferenz gegenüber dem Ausgangssystem in Bild 3 deutlich erhöht. Zusätzlich zur initialen Druckwelle, die durch das schnelle Schließen des Ventils entsteht, kommt es an der Messstelle nicht nur zu den beschriebenen Interferenzen mit der Druckwelle, die durch den Kollaps des Kavitationshohlraums entsteht, sondern zusätzlich noch zu Interferenzen mit weiteren Anteilen dieser beiden Druckwellen, die durch deren Reflexionen in der Abzweigleitung entstehen. Hierdurch handelt es sich um eine sehr „unübersichtliche“ Druckstoßsituation, die der in Kapitel 5 beschriebenen Detailanalyse bedarf, falls die in Bild 13 dokumentierten Druckstoßamplituden eine kritische Höhe überschreiten.

Generell ist in Bild 13 ein Bereich zu erkennen (gelb umrandet), der Parameterkombinationen zeigt, bei denen die Druckstoßamplituden etwas höher sind als beim Referenzergebnis.

Bild 14 präsentiert das konsolidierte Ergebnis der Variantensimulation für die Druckstoßanalyse mit 1,4 m/s Strömungsgeschwindigkeit und 22 H [m] Systemdruck in Tank 1. Dargestellt ist wiederum die maximale Druckstoßamplitude an der Messstelle „p1“ und die Position der Referenzsimulation.

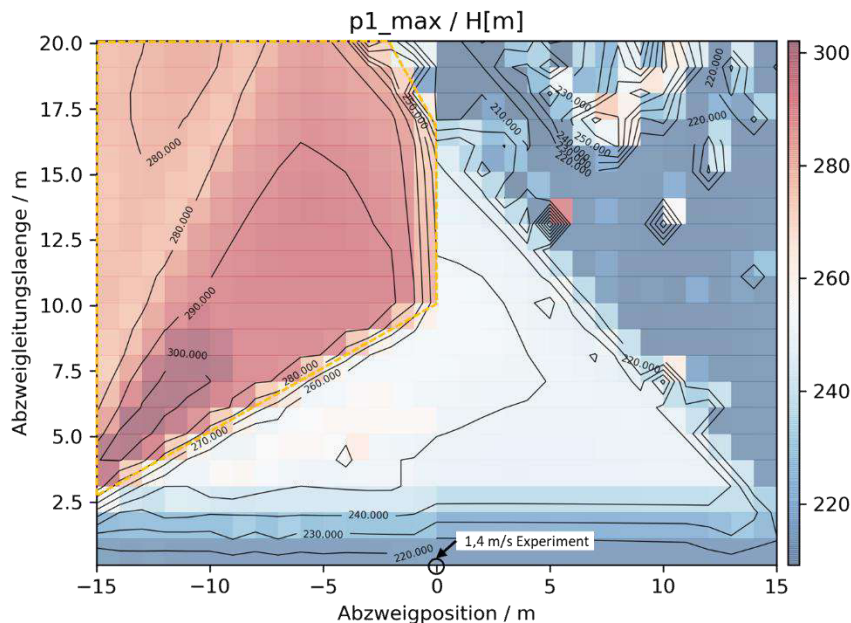


Bild 14: Druckstoßanalyse für 1,4 m/s Strömungsgeschwindigkeit und 22 H [m] Systemdruck in Tank 1

Anders als in Bild 13 gibt es hier einen Bereich (gelb umrandet), bei dem die Druckstoßamplituden mit bis zu 300 H [m] deutlich höher sind als die der Referenzsimulation. Hier ist jetzt dringend eine Detailanalyse der Berechnungsergebnisse empfohlen, die allerdings den Rahmen dieses Beitrags sprengen würde.

7. Zusammenfassung

Kavitations-Druckstöße wurden von der Wissenschaft intensiv erforscht, sodass heutzutage validierte numerische Berechnungsverfahren verfügbar sind, mit denen sich die entstehenden Druckamplituden berechnen lassen. Was fehlt, ist eine praxistaugliche Methode zur Integration dieser Berechnungsverfahren in die alltägliche Projektierung von Rohrleitungssystemen.

Der im Beitrag präsentierte Workflow einer automatisierten Druckstoßberechnung hat das Potenzial solch eine praxistaugliche Methode zu sein. Das zugrundeliegende Simulationsmodell bildet die komplexen Bedingungen in Rohrleitungssystemen realitätsnah ab und ist hierdurch der vereinfachten Druckstoßberechnung mit der Joukowsky-Gleichung deutlich überlegen. Der Beitrag zeigt, dass die präsentierte Methodik keinesfalls auf die Betriebsbedingungen einer geraden Rohrleitung beschränkt ist, sondern auch den Einfluss von Leitungsverzweigungen und die Änderungen des Rohrdurchmessers, des Rohrmaterials, der Rohrwandstärke oder der Reibungskoeffizienten berücksichtigt.

Durch die a priori Berechnung zahlreicher Lastfälle oder Leitungskonfigurationen gepaart mit der anschließenden Konsolidierung der Berechnungsergebnisse zu Nomogrammen erhält der Entwickler ein leicht verständliches grafisches Hilfsmittel zur Druckstoßbewertung seiner

Leitungsauslegung. Kritische Betriebspunkte lassen sich bereits in einem sehr frühen Projektstadium identifizieren und können durch entsprechende Maßnahmen vermieden werden.

Literatur

- [1] Temporelli, G., De Novellis, F., „Hydraulic engineering of inverted siphons in Roman age - a review“, Water Science & Technology – WSTWS / 10.3 / 2010, IWA Publishing 2010, Page 445 - 452
- [2] Bergant, A., Simpson, A. R. and Tijsseling, A. S., 2006, „Water hammer with column separation: A historical review“, Journal of Fluids and Structures, 22, Page 135 - 171
- [3] Seite „Druckstoß“. In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie.
Bearbeitungsstand: 8. Juli 2021, 02:49 UTC.
(Abgerufen: 2. Oktober 2021, 07:29 UTC)
- [4] Walters, T. W., Leishear, R. A., „When the Joukowski equation does not predict maximum water hammer pressures“, Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP 2018, July 15 - 20, 2018, Prague, Czech Republic
- [5] Bergant, A. and Simpson, A.R., „Pipeline column separation flow regimes“, Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 125, No. 8, Aug. 1999, Page 835 - 848.
- [6] Simpson, A. R.; Wylie, E. B., „Large water-hammer pressure for column separation in pipelines“, Journal of Hydraulic Engineering, 1991; 117 (10): Page 1310 - 1316
- [7] n. n., DSHplus – Simulationsprogramm für fluidtechnisch mechatronische Systeme, FLUIDON Gesellschaft für Fluidtechnik mbH, Aachen, 2021
- [8] Karadžić, U., Bulatović, V., Bergant, A., „Valve-Induced Water Hammer and Column Separation in a Pipeline Apparatus“, Journal of Mechanical Engineering 60 (2014) 11, Page 742 - 754
- [9] Baum, H., Müller, B., Breuer, O., „Die Orchestrierung digitaler Zwillinge für Industrie 4.0“, 8. Fachtagung hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruhe, 23. Februar 2021, Seiten 133 - 146, ISBN 978-3-7315-1071-0
- [10] Seite „Statistische Versuchsplanung“. In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie.
Bearbeitungsstand: 29. Juli 2021, 19:09 UTC
(Abgerufen: 2. Oktober 2021, 07:41 UTC)
- [11] Bergant, A., Simpson, A. R. and J. Vítkovský, J., „Developments in unsteady pipe flow friction modelling“, Journal of Hydraulic Research, 39: Page 249 - 257, 2001
- [12] Pasquini, E., „Simulation of Cavitating Flows and Gas Bubble Transport with DSHplus“, <https://web.altair.com/2019-fluidon-webinar>
(Abgerufen: 2. Oktober 2021, 07:35 UTC)

Verfasser: Dr.-Ing. Heiko Baum
 FLUIDON Gesellschaft für Fluidtechnik mbH
 Jülicher Straße 338a
 52070 Aachen
 Tel. +49.241.980935-61
 Fax +49.241.980935-67
heiko.baum@fluidon.com