VERBAND DER
CHEMISCHEN INDUSTRIE e.V.
WIR GESTALTEN ZUKUNFT.

VCI

# Leitfaden

# zur sicherheitstechnischen Betrachtung von Systemen bzw. Netzen in chemischen und prozesstechnischen Anlagen bezüglich Druckstößen und den daraus resultierenden Kräften

Juli 2019

Verantwortliches Handeln

Der VCI unterstützt die weltweite Responsible-Care-Initiative.

VERBAND DER
CHEMISCHEN INDUSTRIE e.V.
WIR GESTALTEN ZUKUNFT.

VCI

Dieses Dokument wurde für den VCI-Fachausschuss „Anlagensicherheit“ erarbeitet:

Michael Salla, BASF
Steffen Ungelenk, Evonik
Rainer Vortmann, Evonik
Gunnar Plaß, Evonik
Guanghua Zheng, Evonik
Wolfgang Micus, 3SConsult
Dr. Andreas Dudlik, Dr. Dudlik Hydraulische Systeme
Jochen Korte, Covestro

**Ansprechpartner:**

Verband der Chemischen Industrie e. V.

Mainzer Landstraße 55, 60329 Frankfurt a. M.

Internet: http://www.vci.de

Thilo Höchst

Telefon +49 (69) 2556-1507, E-Mail: hoechst@vci.de

Dieser VCI-Leitfaden entbindet in keinem Fall von der Verpflichtung zur Beachtung der gesetzlichen Vorschriften. Der Leitfaden wurde mit großer Sorgfalt erstellt. Dennoch übernehmen die Verfasser und der VCI keine Haftung für die Richtigkeit der Angaben, Hinweise, Ratschläge sowie für eventuelle Druckfehler. Aus etwaigen Folgen können deswegen keine Ansprüche, weder gegen den Verfasser noch gegen den VCI, geltend gemacht werden. Dies gilt nicht, wenn die Schäden vom VCI oder seinen Erfüllungsgehilfen vorsätzlich oder grob fahrlässig verursacht wurden.

Juli 2019

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung ..... 4
2 Anwendungsbereich ..... 5
3 Vorgehensweise zur Druckstoßanalyse ..... 6
4 Systemeigenschaften ..... 9
5 Stoffeigenschaften ..... 11
6 Szenarien festlegen ..... 13
7 Annahmen für das Start- und Zielsystem ..... 14
8 Entscheidung Einzelleitung oder Netz ..... 16
9 Druckstoßberechnung ..... 24
10 Erstellung von Berichten ..... 28
11 Beurteilung von Ergebnissen ..... 33
12 Anhang ..... 35

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Die Betriebssicherheitsverordnung hat zum Ziel, den Schutz der Gesundheit von Beschäftigten bei der Verwendung von Arbeitsmitteln zu gewährleisten. Diesem Schutzziel liegen Gefährdungsbeurteilungen zu Grunde, in denen der Arbeitgeber vor Verwendung der Arbeitsmittel Gefährdungen beurteilt und daraus notwendige und geeignete Schutzmaßnahmen ableitet.

Die Technische Regel TRBS 2141 „Gefährdungen durch Dampf und Druck“ konkretisiert die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) hinsichtlich der Ermittlung und Bewertung von Gefährdungen sowie der Ableitung von geeigneten Maßnahmen. **Ein Überschreiten des zulässigen Betriebsdruckes infolge von Druckstößen, z. B. durch Flüssigkeitsschlag und Kavitation, ist hierbei zu vermeiden.**

Die TRBS 2141 Teil I nennt beispielhaft Maßnahmen, wie unzulässige Druckstöße und mögliche Kavitation beim Betrieb von Rohrleitungen vermieden werden können, z. B. durch ausreichend große Schließzeiten von Absperrarmaturen oder Festlegungen zum Ablauf des An- und Abfahrens von Pumpen.

**Ziel des Leitfadens ist es, das Gefährdungspotenzial, welches aus Druckstößen und resultierenden Halterungskräften entsteht, mit möglichst einfachen Short-Cut-Methoden abzuschätzen und damit eine effiziente Hilfestellung für die weitere Betrachtung zu liefern.**

Zu diesem Zweck werden

- eine systematische Vorgehensweise erläutert, die alle wichtigen Schritte zur sicherheitstechnischen Betrachtung von Rohrleitungen der chemischen Industrie bzgl. Druckstöße skizziert sowie
- eine innovative Short-Cut Methode („Waage“) vorgestellt und diskutiert. Dieses Modell kann – nach erfolgter Validierung – als sinnvolle Alternative für bisherige Ansätze dienen, die nicht alle in diesem Leitfaden behandelten Phänomene umfassen.

Mit Hilfe des Leitfadens soll Planern und Betreibern von chemischen und prozess-technischen Anlagen eine einheitliche Vorgehensweise für komplexe Druckstoß- und Kraftberechnungen sowie deren Beurteilung an die Hand gegeben werden.

Besonders herausfordernd sind Betrachtungen, wenn es sich **nicht** um eine einfache Rohrleitung zwischen zwei Punkten handelt, sondern um Rohrleitungen in komplex verschalteten Systemen (Verbundsysteme, Netze).

Der Leitfaden ermöglicht – durch Anwendung von effizienten und sicheren Short-Cut-Abschätzungen – aufwändige Rechenläufe zu minimieren. Ist dies nicht möglich, sollen hiermit einheitliche Szenarien und Bewertungskriterien für Leitungssysteme der chemischen Industrie gesetzt werden.

Im Kapitel 10 werden Empfehlungen für den Aufbau einer sinnvollen Dokumentation ausgesprochen, die als Grundlage für Änderungsprojekte dienen soll.

# 2 Anwendungsbereich

Dieser Leitfaden soll für die **Förderung von Flüssigkeiten und unter Druck verflüssigten Gasen in Rohrleitungssystemen prozesstechnischer Anlagen der chemischen Industrie** Hilfestellung geben,

- **bereits bei der Planung** die Gefahr des Auftretens von Druckstößen und Kondensationsschlägen zu erkennen und durch geeignete planerische Maßnahmen zu vermeiden und
- **beim Betrieb** bestehender Anlagen auftretende Druckstöße und Kondensationsschläge als solche zu identifizieren und praktikable Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

**Nicht behandelt werden in diesem Leitfaden**

- Druckstöße durch chemische Reaktionen bzw. Explosionen
- Druckstöße bei Zweiphasenströmung durch Flüssigkeitspfropfen (Kolbenströmung) Ausnahme: Erstbefüllung von Rohrleitungen ("Priming")
- Druckstöße bei Molchvorgängen
- Druckpulsationen durch Resonanzeffekte oder / und diskontinuierliche Förderung
- Druckaufbau durch Zwangsförderung in geschlossenen Systemen
- Druckaufbau durch thermische Ausdehnung eingesperrter Flüssigkeit
- Interaktion zwischen Flüssigkeit und Rohrleitung: Fluid-Struktur-Wechselwirkungen
- Druck- und Lasteinträge durch Schwingungen in Gas- und Dampfleitungen
- kombinierte Lastfälle, z. B. Druckstoß und Korrosion
- eine exakte Berechnung der durch Druckstöße entstehenden Halterungslasten. Diese können nur in Kombination von fluiddynamischen mit Struktur-Berechnungsprogrammen (z.B. CAESAR2, ROHR2) ermittelt werden.

# 3 Vorgehensweise zur Druckstoßanalyse

In diesem Leitfaden wird eine Druckstoßanalyse für Chemie-Rohrleitungen wie folgt durchgeführt:

Die schematische Darstellung dieser zielgerichteten Vorgehensweise ist im Anhang 12.7 dargestellt und beinhaltet alle wichtigen Schritte zur sicherheitstechnischen Betrachtung von Rohrleitungen der chemischen Industrie bzgl. Druckstöße.

- Zunächst werden Idee und Ziel der neuen Short-Cut-Methodik zum hydraulischen Gefährdungspotenzial von Chemie-Rohrleitungen vorgestellt („**Waagenmodell**“) (siehe Kapitel Short-Cut-Methodik 3.1 bis 3.4). Aufbau und Erläuterungen zu dieser Short-Cut Methodik finden sich im Anhang 12.1).
- Hierzu werden die folgenden Informationen benötigt (System- und Stoffeigenschaften, Kap. 4 & 5 ).
- Im Anschluss erfolgen die Auswahl und Festlegung der relevanten Druckstoßszenarien (Kap. 6).
- Es werden Annahmen für die vereinfachte Berechnung getroffen (Kap. 7).
- In Kap. 8 wird erörtert, inwiefern Netze in Einzelleitungen gesplittet werden können.
- Die Beschreibung der Druckstoßberechnung erfolgt in Kap. 9.
- Es erfolgt ein Zwischenbericht mit den getroffenen Annahmen sowie Vorschlägen für Vermeidungsmaßnahmen (Kap. 10).
- Der Abgleich der getroffenen Annahmen (aus Kap.7) mit dem Betreiber ist in Kap. 10.2 erläutert.
- Nach Abgleich der Annahmen (und ggf. Neuberechnung) wird ein Abschlussbericht incl. einer belastbaren Beurteilung der Leitung / des Leitungsnetzes erstellt (Kap. 10.3 & 11).

## 3.1 Short-Cut-Methodik

Short-Cut-Methoden sind in der Regel vereinfachte Abschätzungen zur Beurteilung von Druckstößen, Kondensationsschlägen oder den daraus resultierenden Kräften. Sie sollen anhand einiger weniger Parameter eine erste Einschätzung ermöglichen, ob ein Rohrleitungssystem gefährdet ist oder nicht.

Es existieren verschiedenste Short-Cut-Methoden. Die wohl bekannteste auf diesem Gebiet ist die Anwendung der Joukowski-Gleichung[1]. Allerdings werden mit den bisher bekannten Methoden meist nur einzelne Gefahren im Zusammenhang mit Druckstößen beurteilt, wie z. B. allein das Überschreiten von vorgegebenen Drücken durch den Druckstoß.

[1] N. E. Joukowski: Über den hydraulischen Stoss in Wasserleitungsröhren. In: Mémoires de l’Académie Impériale des Sciences de St.-Pétersbourg, Ser. 8, 9, 1900, S. 1-72

Im Rahmen der Erstellung des vorliegenden Leitfadens wird deshalb eine Methode entwickelt, die mehrere bekannte Short-Cut-Methoden kombiniert. Diese neue Methode soll möglichst allen relevanten Parametern Rechnung tragen und so dem Anwender die Entscheidung erleichtern, ob ein Rohrleitungssystem anhand eines Simulationsmodells detailliert betrachtet werden soll oder nicht.

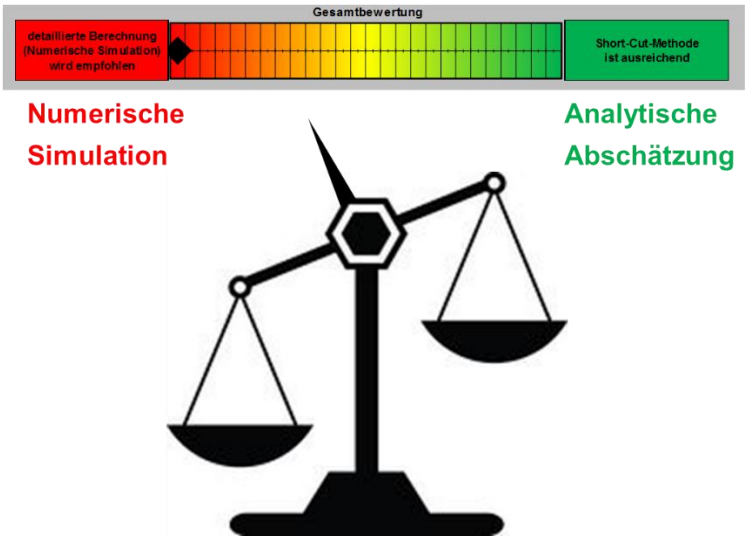



**Abbildung 1: Schematische Darstellung Modellwaage**

Die neue Methode berücksichtigt alle relevanten Parameter und wiegt positive Einflüsse gegenüber negativen Einflüssen auf, ähnlich wie eine herkömmliche Balken-Waage Gewichte gegeneinander aufwiegt (s. Abb. 1). Die Methode wird deshalb „Entscheidungswaage“, oder kurz „Waage“, genannt. Die Vorstellung ist, dass man alle Aspekte, die zu hohen Druckstößen führen, auf eine Seite der Waage legt (mit einer zusätzlichen Gewichtung der einzelnen Parameter) und alle Aspekte, die dafür sprechen, dass keine Gefährdung durch Druckstöße, Kondensationsschläge und daraus hervorgerufene Axialkräfte vorliegt, auf die andere Seite der Waage. Die Waage zeigt, ob eine detaillierte Druckstoßberechnung (numerische Simulation) notwendig ist (Waage schlägt dann in den roten Bereich aus) oder ob eine analytische Abschätzung ausreichend erscheint (Waage schlägt in den grünen Bereich aus).

Das Waagen-Modell bewertet für ein zu betrachtendes Rohrleitungssystem die vier folgenden „Grundrisiken“, die zu unzulässigen Drücken oder Kräften führen können:

1. Das Risiko, dass der Druck durch einen Druckstoß **den zulässigen Druck übersteigt**.
2. Das Risiko, dass die durch Druckstöße oder Kondensationsschläge auftretenden Kräfte **die zulässigen Kräfte übersteigen**.
3. Das Risiko, dass sich bei fehlendem Druckerzeuger (z. B. bei abgestellter Pumpe) **stationäre Dampfblasen an den Hochstellen** des Rohrleitungssystems ausbilden können, weil aufgrund der Höhendifferenzen das Fluid gravitationsbedingt ablaufen kann. Bei fehlender Belüftung bildet sich dann eine Dampfblase an der Hochstelle, die bei Wiederaufbau des Drucks Kondensationsschläge nach sich zieht.

4. Das Risiko, dass es aufgrund eines schnellen Schließens einer Armatur am Leitungsanfang oder aufgrund eines Ausfalls einer Pumpe zu **Kondensationsschlägen** kommen könnte. Diese sind in der Regel analytisch nur schwer abzuschätzen.

Die Druckstöße können von den Parametern, die in Tabelle 1 in Anhang 12.3 aufgelistet sind, beeinflusst werden. Bestimmte Kombinationen der Parameter können das Gefahrenpotenzial eines unzulässigen Druckstoßes im System erhöhen. Das Gefahrenpotenzial kann z. B. durch das Waagen-Modell über eine Gewichtungsmethode ausgewertet werden. Diese oder auch andere verfügbare Short-Cut-Methoden sollen bei der Beurteilung helfen, wie detailliert man sich in einem konkret vorliegenden Fall mit der Thematik auseinandersetzen bzw. welchen Aufwand man treiben muss, um die Gefährdungsbeurteilung hinsichtlich der Druckstöße durchführen zu können. Das Waagen-Modell zielt darauf ab, möglichst allen relevanten Parametern Rechnung zu tragen (siehe Anhang 12.3).

Eine detaillierte Beschreibung des „Waagen-Modells“ ist im Anhang (Abschnitt 12.1) aufgeführt.

## 3.2 Waage grün

Schlägt das Waagen-Modell eindeutig in Richtung „grün“ aus, dann bedeutet das, dass man das Rohrleitungssystem nicht detailliert in einem Simulationsmodell analysieren muss, sondern dass man, den nötigen Sachverstand vorausgesetzt, mit dem Waagen-Modell zu einer Gefährdungsbeurteilung gelangen kann.

Ein Beispiel hierfür ist eine unverzweigte Rohrleitung mit einer Absperrarmatur am Leitungsende, bei der die Druckerhöhung geringer ist als der Abstand des höchstmöglichen Betriebsdrucks zum zulässigen Druck.

## 3.3 Waage gelb

Zeigt die Waage nach Eingabe der notwendigen Werte für die abgefragten Parameter ein Ergebnis, das weder eindeutig in Richtung „grün“ noch eindeutig in Richtung „rot“ geht, also im Bereich „gelb“ verbleibt, dann sollte ein Fachmann / Experte zu Rate gezogen werden. Dieser kann dann weitere Informationen (z. B. R&I-Fließbilder, Informationen zur Fahrweise, Betriebsdaten, etc.) einholen, die es ihm ermöglichen, das System besser einzuschätzen. Aufgrund dieser weitergehenden Informationen kann der Experte eine Empfehlung geben, die entweder zu Gunsten einer detaillierten Berechnung (Simulation) oder einer vereinfachten analytischen Abschätzung ausfällt.

## 3.4 Waage rot

Schlägt die Waage eindeutig in Richtung „rot“ aus, ist auf jeden Fall geboten, das Rohrleitungssystem von einem Experten unter Zuhilfenahme eines Simulationsmodells analysieren zu lassen. In diesem Fall gibt es aufgrund der eingegebenen Parameter ganz offensichtlich Hinweise darauf, dass unzulässige Drücke oder Kräfte auftreten können.

# 4 Systemeigenschaften

Bevor ein System näher untersucht werden kann, müssen die relevanten Systemeigenschaften und -grenzen definiert werden. Es ist zu empfehlen, sogenannte „Start“-, „Transport“- und „Zielsysteme“ zu definieren.

Grundsätzlich gilt:

- Ein Startsystem speist in eine Leitung oder ein Netz ein.
- In einem Transportsystem wird die Flüssigkeit über eine Distanz (> 50 m) transportiert (siehe Kap. 8.2.4).
- In einem Zielsystem wird die Flüssigkeit aus der Leitung / dem Netz hydraulisch entkoppelt und anschließend weiter verwendet / gelagert.

Es sind dementsprechend zunächst die zugehörigen Betreiber, Leitungen und Schnittstellen zu definieren. Abbildung 2 und die zugehörige Legende beschreiben, welche Systemeigenschaften für eine anschließende Bewertung notwendig werden können.

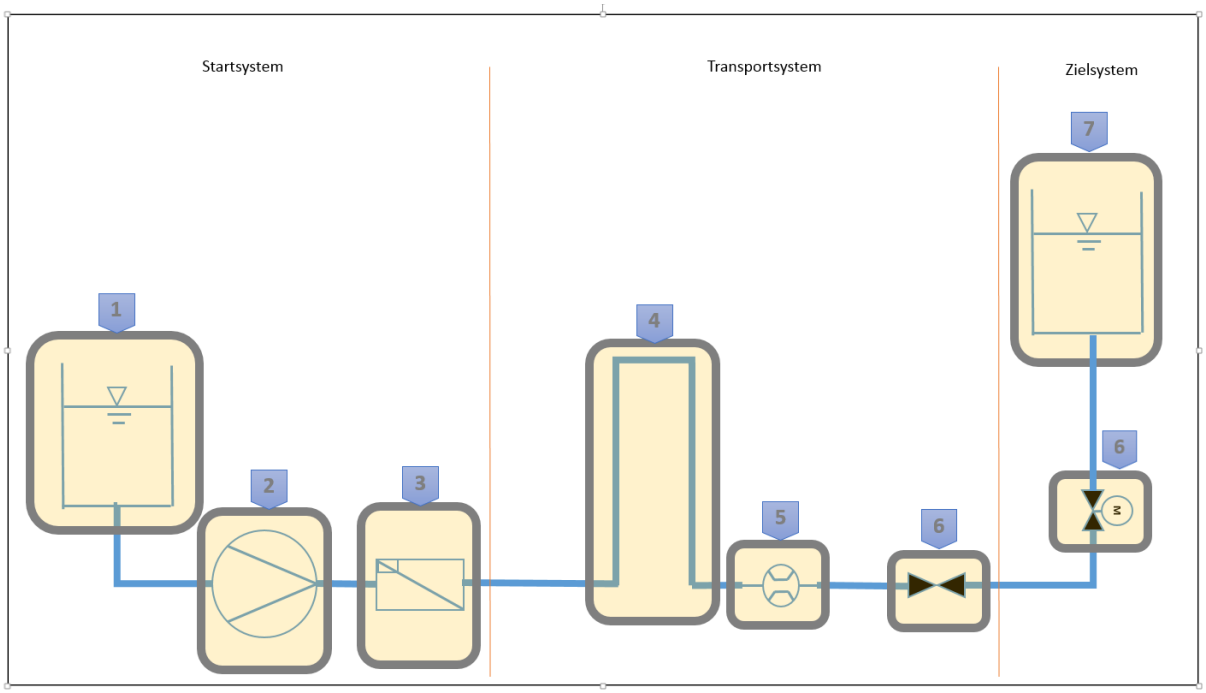



**Abbildung 2: Beispiel zur Festlegung von Systemeigenschaften und Grenzen**

① Vorlagebehälter: Füllstand, System- & Dampfdruck

② Pumpe: Pumpenanzahl, Fahrweise, Pumpenkennlinien, Volumenströme

③ Rückschlagklappe: Kennlinien

④ Rohrleitung: Länge, Durchmesser, Material, geodätisches Höhenprofil, längste gerade Schenkel im System, Art der Halterung der Rohrleitung, tote Enden

⑤ Querschnittsänderung: Durchflussmessung, Blende usw.

⑥ Armatur: Typ, Durchmesser, Kennlinien, effektive Schließzeit

⑦ Behälter: Gegendruck, Füllstand

Die genannten Systemeigenschaften ① - ⑦ sind die für eine Druckstoßbetrachtung erfahrungsgemäß am wichtigsten, müssen jedoch für das jeweilige System im Einzelfall ermittelt werden.

Abbildung 2 stellt eine *Einzelleitung* dar. Die Kombination aus mehreren Start- und Zielsystemen oder Leitungswegen ergeben differenziert zu betrachtende Leitungs- oder *Netzsysteme*, siehe Kap. 8.

# 5 Stoffeigenschaften

### Schallgeschwindigkeit

Im Fall des Entstehens eines Druckstoßes pflanzt sich die Druckwelle mit der **Schallgeschwindigkeit des Fördermediums in der Rohrleitung, der sogenannten „Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit“** fort. Die Amplitude der Druckwelle wird von Fluideigenschaften stark beeinflusst.

Die Schallgeschwindigkeit $a_0$ ist ein Maß für die Kompressibilität von Fluiden. Im Unterschied zu Gasen (z. B. Luft: ca. 330 m/s, 20°C) sind Flüssigkeiten weitaus geringer kompressibel und erreichen damit höhere Schallgeschwindigkeiten (z. B. Wasser: ca. 1450 m/s bei 20°C).

Für die meisten Fluide steigt die Schallgeschwindigkeit mit sinkender Temperatur. Sie kann direkt aus dem Elastizitätsmodul E und der Dichte ρ des Mediums ermittelt werden gemäß

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Es bestehen jedoch bei Flüssigkeiten z. T. erhebliche Unterschiede in der Kompressibilität. Beträgt die Schallgeschwindigkeit von 30%-iger NaOH-Lösung etwa 2.300 m/s, liegt sie für Butadien lediglich bei 960 m/s, jeweils für Raumtemperatur.

Bei einem Druckstoß dehnt sich das Leitungsmaterial geringfügig und führt damit zu einer Verringerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle im Rohr (Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit a). Diese steht mit der Schallgeschwindigkeit $a_0$ des Mediums in folgender Beziehung:

$$a = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{\mathrm{E} \cdot d}{E_M \cdot s}}}$$

Mit d: Rohrinnendurchmesser; s: Wanddicke; $E_M$: Elastizitätsmodul der Rohrleitung

Für das Beispiel Wasser reduziert sich die Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit im Vergleich zur Schallgeschwindigkeit bei Raumtemperatur von 1450 m/s auf ca. 1000 m/s in Stahlrohren und stellt damit die relevante Berechnungsgröße für den Druckstoß dar.

Im Folgenden wird in diesem Leitfaden immer mit der **Druckwellenausbreitungs-geschwindigkeit** gerechnet.

### Schallgeschwindigkeit und Dampfdruck

Da die Schallgeschwindigkeit und der Dampfdruck stark von der Temperatur abhängig sind, spielt die Temperatur eine wichtige Rolle in der Druckstoßbetrachtung. Gewöhnliche Methode ist, dass die Druckstoßberechnung bei einer konstanten Temperatur (Isotherme Bedingungen) durchgeführt werden kann. Die durch Wärmeverluste und externe Wärmezufuhr (Sonnenstrahlung) verursachte Temperaturerhöhung kann in der Druckstoßbetrachtung vernachlässigt werden.

Da die unter Druck stehenden Flüssiggase höhere Dampfdrücke als normale Flüssigkeiten besitzen und die Dampfdrücke stark von der Temperatur (Dampfdruck ↑ = *f* (Temperatur ↑))

abhängig sind, haben die unter Druck stehenden Flüssiggase größeres Gefahrenpotenzial in Bezug auf Druckstoßbetrachtungen. Es ist zu prüfen, ob der Druckstoß auch bei maximal möglicher Temperatur zu berücksichtigen ist.

# 6 Szenarien festlegen

Grundsätzlich führen schnelle Änderungen des stationären Betriebszustandes zu Druckstößen. Es muss bewertet werden, ob durch die Änderung eine harmlose Druckerhöhung oder ein gefährlicher Druckstoß verursacht wird.

Je schneller die Änderung erfolgt, desto stärker wirkt sich der Druckstoß aus.

Die Definition der Szenarien muss im Vorfeld erfolgen, so dass

- Missverständnisse vermieden werden,
- nach Möglichkeit Szenarien begründet ausgeschlossen werden können und somit die
- Anzahl der Rechenläufe minimiert wird.

Die folgenden Szenarien sind

- im bestimmungsgemäßen Betrieb sowie
- bei In- und Außerbetriebnahmen

mögliche Ursachen für fluiddynamische Last- und Druckextrema.

Für jedes Szenario werden allgemeine Vermeidungsstrategien angeführt. Zu prüfen ist zunächst, welche Szenarien *ausgeschlossen* werden können. Szenarienvorschläge finden sich im Anhang

**Generelle Anmerkungen:**

Eine temporäre Unterschreitung des Dampfdrucks im System ist möglichst zu vermeiden (kritischer Kondensationsschlag bzw. Kavitationsschlag).

Lässt sich ein Szenario vereinfacht abschätzen (z. B. mit der Waage), so ist dies in Kap. 12.1 beschrieben.

# 7 Annahmen für das Start- und Zielsystem

Für die Berechnung möglicher Druckstöße in einem *frühen Stadium* sind dem Berechnungsingenieur

- auf dem Transportsystem ***alle*** notwendigen System- und Betriebsparameter (Randbedingungen) bekannt
- auf den Seiten Start- und Zielsystem sind ***nicht alle*** notwendigen Randbedingungen bekannt.

Es werden für Start- und Zielsysteme zunächst *realitätsnahe, konservative Annahmen* (siehe Abbildung 3: Annahmen für ein Start und Zielsystem) getroffen, um ermitteln zu können, ob ein Leitungssystem potenziell druckstoßgefährdet ist oder nicht.

Dieses Vorgehen vermindert den hohen zeitlichen Aufwand zur Recherche der tatsächlichen Randbedingungen in den Start- und Zielsystemen für den Fall, dass das betrachtete Leitungssystem *nicht druckstoßgefährdet* ist.

Bei dennoch möglichen, unzulässigen Last- und Druckspitzen werden diese Annahmen im Anschluss mit dem Betreiber abgeglichen und es erfolgt eine erneute Berechnung mit den tatsächlichen Randbedingungen (s. Kap. 10.2).

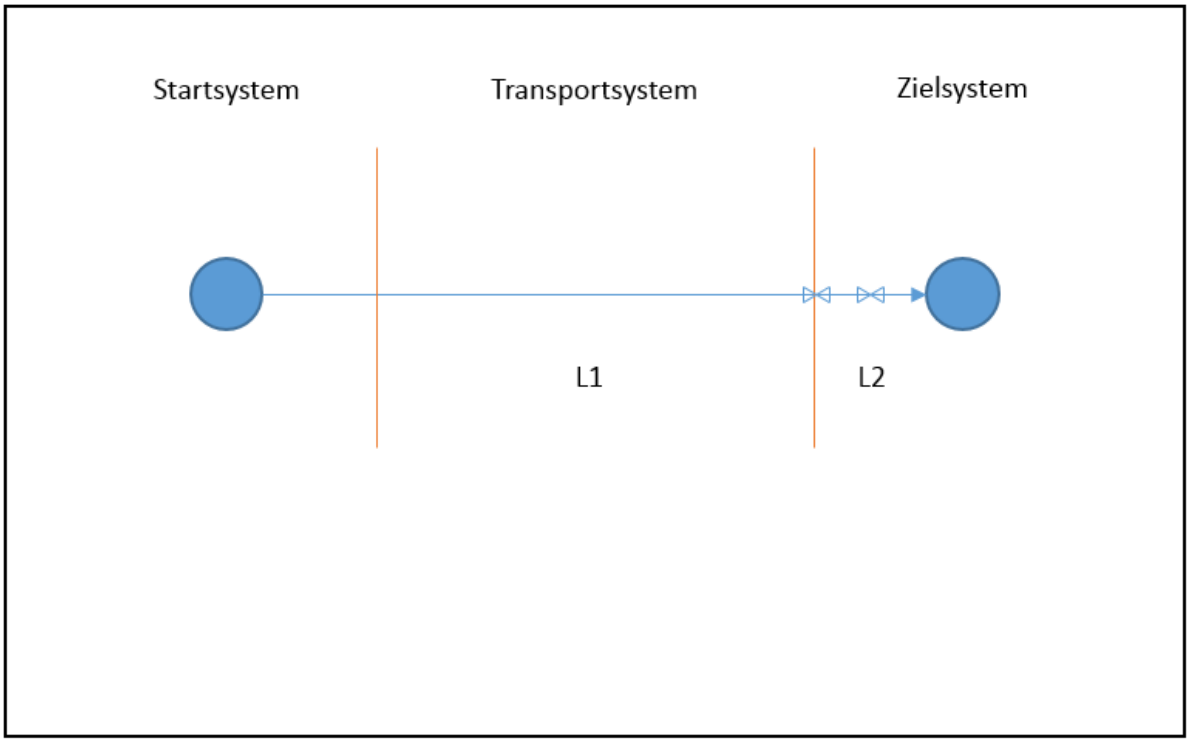



**Abbildung 3: Annahmen für ein Start und Zielsystem**

Die *konservativen Annahmen* der Randbedingungen für die Betreiberseite sind im Folgenden beschrieben:

Beim Übergang eines Leitungsnetzes von Transport- zu Start- oder Zielsystem sind einige notwendige System- und Betriebsparameter (Druckerzeuger, Höhenprofil, Länge und Verzweigung der Leitung L2, Schließzeit und Armaturentyp…) zunächst unbekannt und

werden wie folgt *konservativ* abgeschätzt (siehe Abbildung 3: Annahmen für ein Start und Zielsystem):

| | | |
|---|---|---|
| Startsystem | Druckerzeuger: | Nullförderhöhe und Nullförderdruck (maximaler Pumpenvordruck + maximaler Pumpendruck) |
| Zielsystem | Axiale, unverzweigte Länge L2 der Leitung im Betrieb bis zum Behälter[2]: | 150 m |
| | Schließzeit der Armatur (Schieber, Füllstandsicherung)[3]: | 1 s pro Zoll (25 mm) Armaturen-Nennweite |

Diese müssen anschließend validiert werden, siehe auch Kap. 10.2.

[2] Z. B. Halbe Baufeldlänge

[3] Leitungsdurchmesser DN 50 ≈ 2 Zoll → 2 Sekunden

# 8 Entscheidung Einzelleitung oder Netz

## 8.1 Einzelleitungen

Wenn zwischen eindeutigem Startsystem (z. B. Kugel) und Zielsystem (z. B. Behälter) eine Druckleitung liegt, über die der komplette Volumen-/ Massenstrom gepumpt wird, spricht man von einer Einzelleitung, siehe Abbildung 4: Beispiel A Einzelleitung.

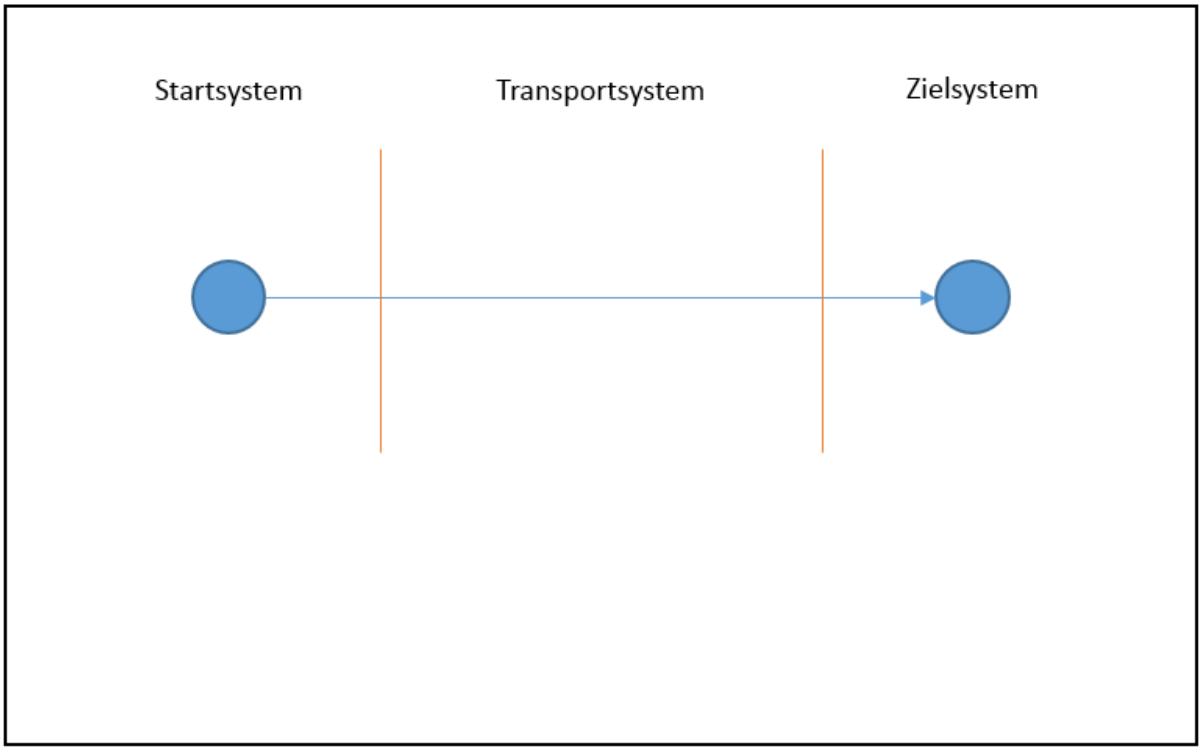



**Abbildung 4: Beispiel A Einzelleitung**

Zwei parallel verlegte Leitungen können auch als Einzelleitung betrachtet werden, wenn diese

- hydraulisch voneinander getrennt sind oder
- bei gleicher Länge und gleicher Nennweite die Volumen-/ Massenströme sich hälftig aufteilen, siehe Abbildung 5: Beispiel B Einzelleitung

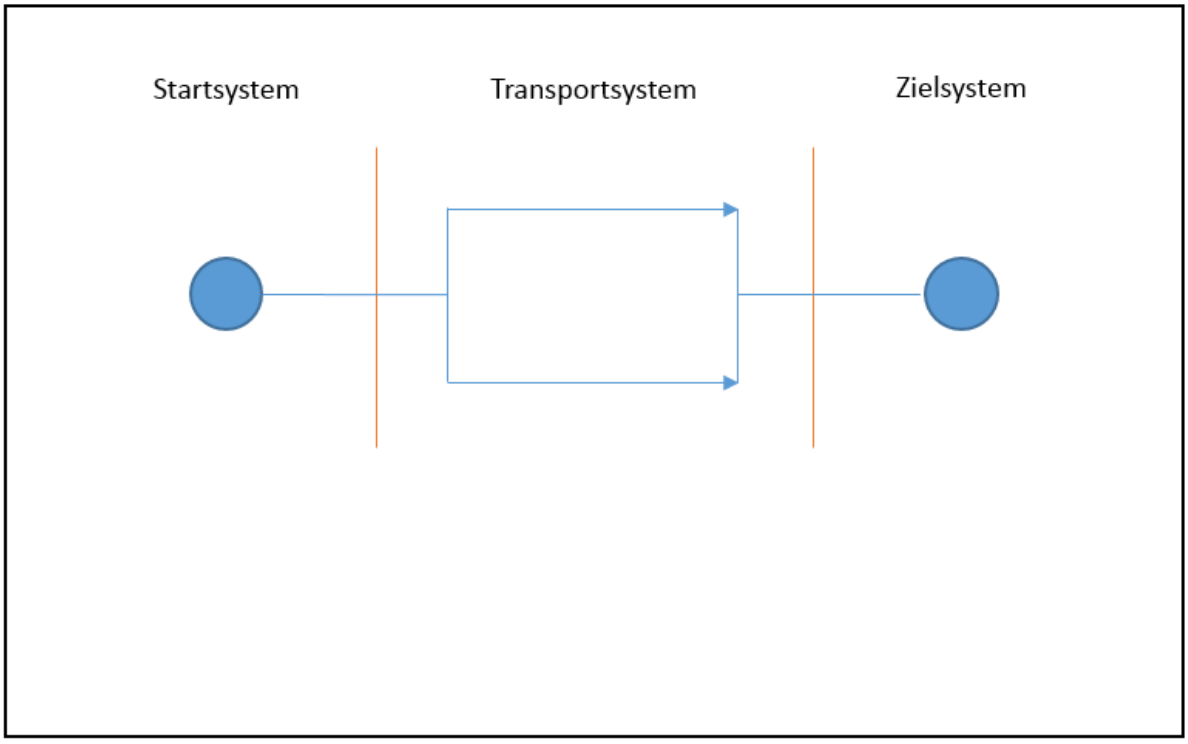



**Abbildung 5: Beispiel B Einzelleitung**

Sollte im Startsystem z. B. aus verschiedenen Behältern das zu fördernde Medium entnommen werden können, gilt die Betrachtung für eine Einzelleitung nur, wenn *eine* und *nicht mehrere* Behälter gleichzeitig aktiv geschaltet sind.

Gleiches gilt für das Zielsystem: Es wird nur in einen und nicht in mehrere Behälter gleichzeitig gepumpt, siehe Abbildung 6: Beispiel C Einzelleitung.

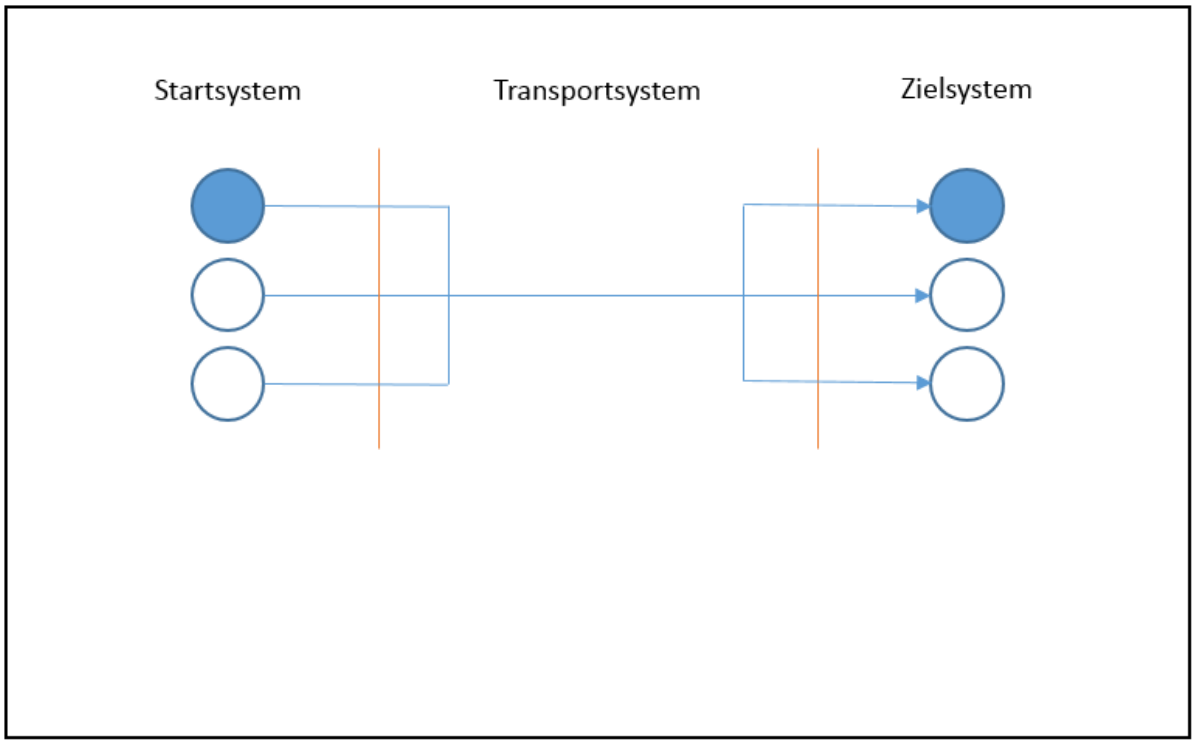



**Abbildung 6: Beispiel C Einzelleitung**

## 8.2 Netze

### 8.2.1 Verzweigtes Leitungssystem

Werden die zu fördernden Medien zeitgleich

- aus mindestens 2 Startsystemen in ein oder mehrere Zielsysteme bzw.
- aus einem Startsystem in zwei oder mehrere Zielsysteme

gepumpt, spricht man von *verzweigten* Leitungssystemen, auch wenn zwischen Start- und Zielsystem nur eine Druckleitung liegt.

**Die Fließrichtung ist eindeutig, siehe** Abbildung 7: Beispiel D Verzweigtes Leitungssystem.

➔ **Zerlegung möglich**

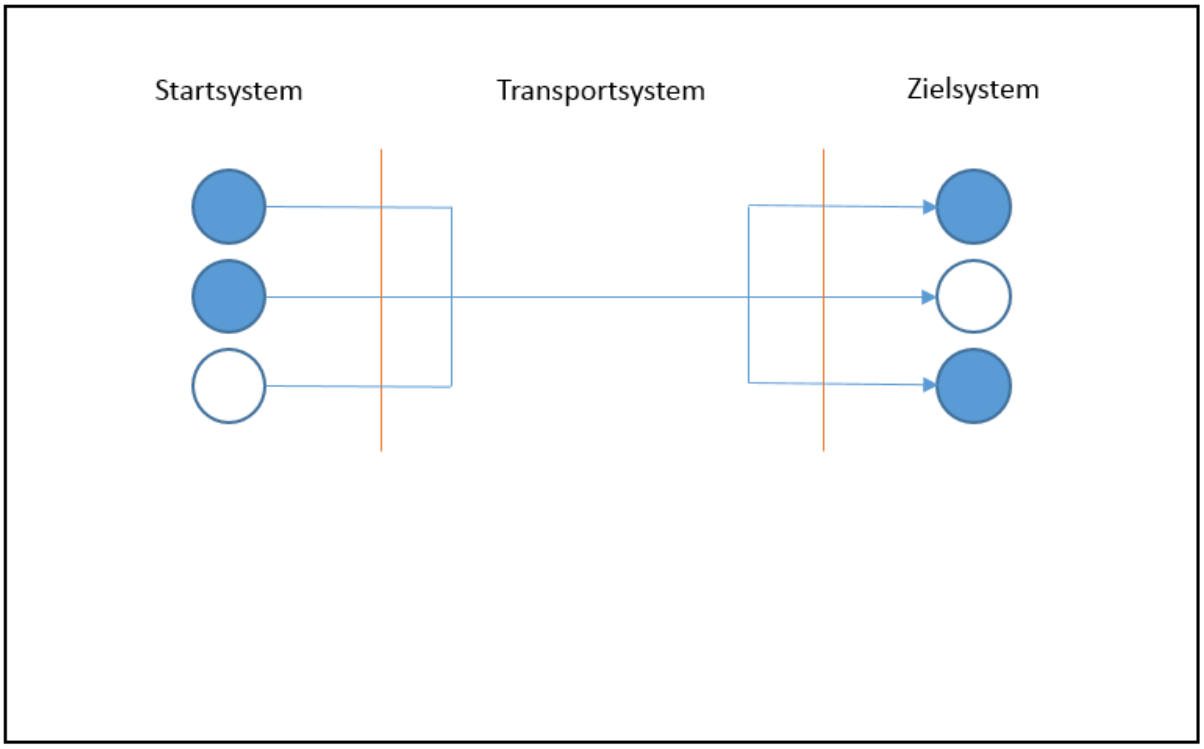



**Abbildung 7: Beispiel D Verzweigtes Leitungssystem**

### 8.2.2 Verbundsystem (Netz)

Können die zu fördernden Medien in verschiedene Richtungen gepumpt werden und dabei Druckleitungen in beide Richtungen durchströmen, spricht man von einem *Verbundsystem* oder auch von einem Netz.

Das Startsystem kann das Zielsystem sein und umgekehrt.

**Die zu fördernden Volumen-/ Massenströme im Netz sind nicht eindeutig, siehe** Abbildung 8: Beispiel E Verbundsystem

➔ **Zerlegung prüfen**

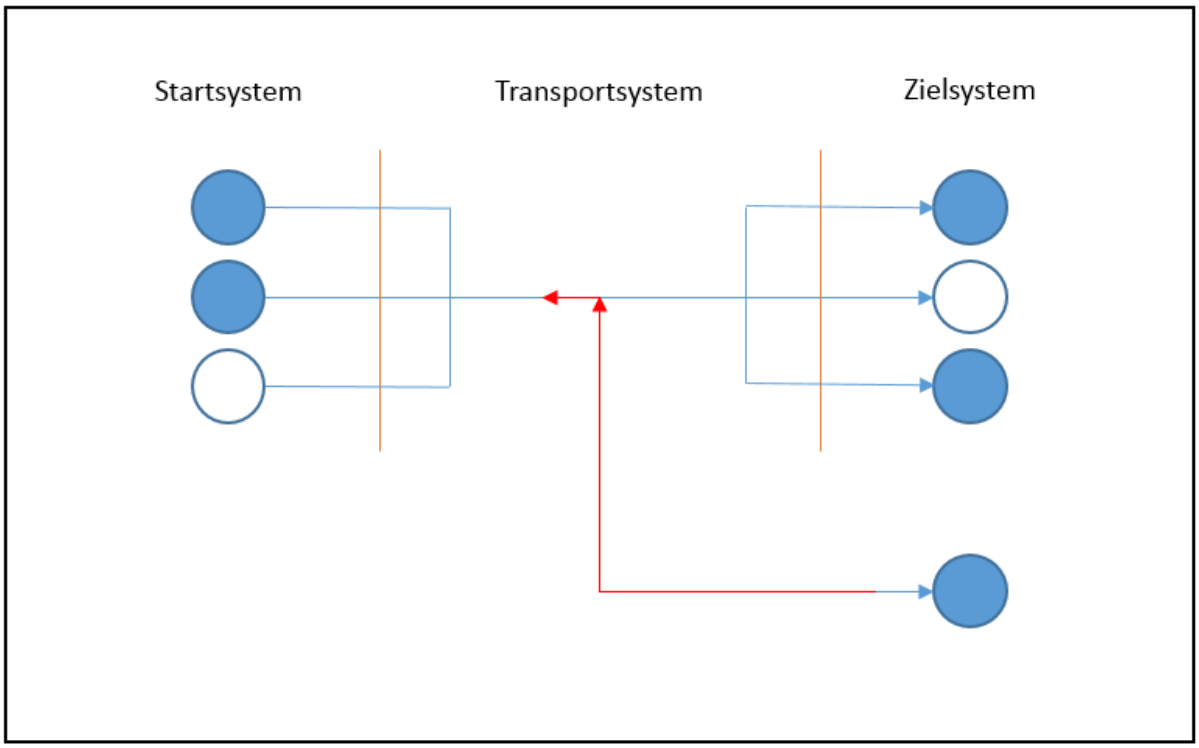



**Abbildung 8: Beispiel E Verbundsystem**

### 8.2.3 Vermaschtes Netz

**Kriterium = Ringleitung, Fließrichtung nicht eindeutig bestimmbar, siehe** Abbildung 9: Beispiel F Vermaschtes Netz

➔ **Zerlegung prüfen**

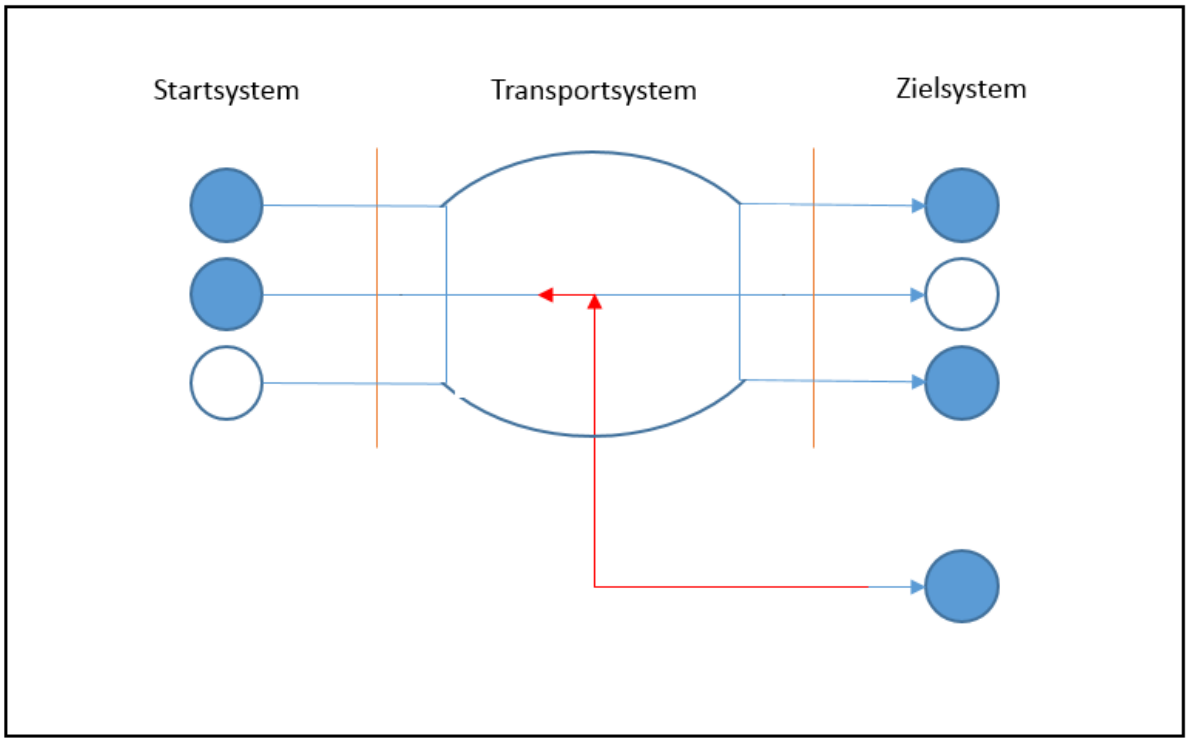



**Abbildung 9: Beispiel F Vermaschtes Netz**

### 8.2.4 Prüfung der Zerlegung eines Netzes

Eine Zerlegung eines Netzes ist möglich, wenn es ein Startsystem gibt und die Aufteilung des Volumen-/ Massenstroms beschreibbar ist. Über die einzelnen Volumen-/ Massenströme lassen sich längs der Förderstrecken über die zugehörigen Nennweiten die **druckstoßrelevanten Strömungsgeschwindigkeiten in allen Teilabschnitten ermitteln**.

Sind im Netz Betriebsfälle möglich, bei denen eine Netzleitung als Einzelleitung hydraulisch vom Rest-Netz betreibbar ist und zudem ein maximaler Volumen-/ Massenstrom gefördert wird, dann ist dieser für das als Einzelleitung betriebene Teilsystem druckstoßrelevant.

In allen anderen Fällen ist eine Netzzerlegung nicht möglich.

Hinweise:

- ➔ Nennweitensprünge:
  Zu beachten sind dabei auch Nennweitensprünge, die bei gleichem Volumen-/ Massenstrom zu einer Änderung der Strömungsgeschwindigkeit führen:
  Reduzierung Nennweite -> Erhöhung Strömungsgeschwindigkeit und umgekehrt.
  Je höher die Strömungsgeschwindigkeit und somit deren mögliche Änderung desto größer das Druckstoßpotenzial.

- ➔ Abschnittslängen und tote Äste:
  Ob eine Netz-Leitung druckstoßrelevant ist, hängt auch von den Abschnittslängen ab. Da durch Schaltungshandlungen von Pumpen bzw. Armaturen Druckänderungen (Druckstöße) in einer Zehntelsekunde entstehen können, die mit Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit von ca. 1.000 m/s (je nach Fluid) durch die Druckleitungen wandern, ergeben sich druckstoßrelevante Leitungslängen von etwa 50 m und mehr. Hintergrund dieses Richtwertes ist der mögliche Schnellschluss einer AUF-ZU-Armatur in 1 s, von der nur die letzten 10 % drosselnd wirken und somit druckstoßrelevant sind. Die effektive Schließzeit beträgt dementsprechend nur 0,1 s, in der eine Druckwelle mit einer Geschwindigkeit von 1.000 m/s sich 100 m im Rohrleitungssystem fortbewegt (0,1 s x 1.000 m/s). Aufgrund der möglichen Schwankungsbreite der Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit stellen die 50 m einen konservativen Richtwert dar[4] (halbe Wirklänge des Druckstoßes bei Schnellschluss).

  Die Mindestleitungslänge von 50 m gilt auch für tote Äste und Abzweige zu Behältern, Kugeln o. ähnlichem.

  Kürzere Leitungen als 50 m sind dann druckstoßrelevant, wenn es zu einem Kavitationsstoß (Auflösung von Dampfzonen) im Druckleitungssystem kommen kann. Am stärksten kavitationsgefährdet sind hochliegende Leitungsabschnitte, z. B. Rohrbrücken.

- ➔ Dampfdruck:
  Findet eine Verdampfung des Mediums erst im Unterdruckbereich (Beulgefahr) statt und gibt es hochliegende Leitungsabschnitte im Netz, ist eine Zerlegung des Netzes

[4] Diese können bei Auftreten von Kondensationsschlägen jedoch erheblich kürzer sein (ca. 5-10m)

nicht möglich.

➔ Druckerzeuger (Pumpen):
Gibt es mehrere Druckerzeuger an verschiedenen Standorten, die gleichzeitig in ein hydraulisch zusammenhängendes Druckleitungssystem fördern, ist eine Zerlegung des Netzes nicht möglich.

### 8.2.5 Kritischer Pfad im Netz erkennbar

**Die Herleitung eines kritischen Pfades muss durch einen Experten erfolgen, der die Herleitung plausibel darstellen muss und nachvollziehbar dokumentiert.**

Ein aus Druckstoßsicht kritischer Pfad ist im Netz erkennbar, wenn es möglich ist, mit einer zentralen Armatur am Leitungsanfang bzw. am Leitungsende des Netzes durch Zufahren einen Großteil des gesamten Fördervolumenstroms zum Stoppen zu bringen.

Der Anteil des Volumen-/ Massenstroms über die zufahrende Armatur sollte mindestens 50 % [5] von der Gesamtfördermenge betragen.

Vor und/ oder nach der zufahrenden Armatur sollte eine nennenswerte Leitungslänge mit eindeutiger Nennweite und ohne aktive Abzweige, über die das Medium entweichen könnte, liegen. Die Leitungslänge ist im Verhältnis zur gesamten Leitungslänge zu sehen und muss einen markanten Anteil ausmachen. Zudem sollte die aus dem Stoppen des Volumenstroms resultierende Strömungsgeschwindigkeitsänderung größer 1 m/s [6] sein.

Auch das Verhältnis der Nennweitensprünge im Fließweg spielt eine Rolle. Sollte vor und/ oder hinter dem vom Zufahren der Armatur betroffenen eindeutigen Leitungsabschnitt eine Leitung mit größerer Nennweite anschließen, so wirkt dieser druckstoßdämpfend.
Je größer das Querschnittsflächenverhältnis desto stärker die Dämpfungswirkung, weil die Strömungsgeschwindigkeit(sänderung) entsprechend kleiner wird und zudem Druckwellenreflexionen einsetzen.

**Beispiel:** DN80 auf DN100 bedeutet eine Erhöhung des Fließquerschnittes auf 156 % und somit eine Reduzierung der Fließgeschwindigkeit auf 64 % (Kehrwert).

**Innendurchmesserabhängige Fließquerschnitte**

$A_i = \pi * D_I^2 / 4$

$D_I$ = Innendurchmesser

| DN=DI | Ai | 6 | 8 | 10 | 15 | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 65 | 80 | 100 | 125 | 150 | 200 | 250 | 300 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm | mm² | 28 | 50 | 79 | 177 | 314 | 491 | 804 | 1257 | 1963 | 3318 | 5027 | 7854 | 12272 | 17671 | 31416 | 49087 | 70686 |
| 6 | 28 | 100% | 178% | 278% | 625% | 1111% | 1736% | 2844% | 4444% | 6944% | 11736% | 17778% | 27778% | 43403% | 62500% | 111111% | 173611% | 250000% |
| 8 | 50 | 56% | 100% | 156% | 352% | 625% | 977% | 1600% | 2500% | 3906% | 6602% | 10000% | 15625% | 24414% | 35156% | 62500% | 97656% | 140625% |
| 10 | 79 | 36% | 64% | 100% | 225% | 400% | 625% | 1024% | 1600% | 2500% | 4225% | 6400% | 10000% | 15625% | 22500% | 40000% | 62500% | 90000% |
| 15 | 177 | 16% | 28% | 44% | 100% | 178% | 278% | 455% | 711% | 1111% | 1878% | 2844% | 4444% | 6944% | 10000% | 17778% | 27778% | 40000% |
| 20 | 314 | 9% | 16% | 25% | 56% | 100% | 156% | 256% | 400% | 625% | 1056% | 1600% | 2500% | 3906% | 5625% | 10000% | 15625% | 22500% |
| 25 | 491 | 6% | 10% | 16% | 36% | 64% | 100% | 164% | 256% | 400% | 676% | 1024% | 1600% | 2500% | 3600% | 6400% | 10000% | 14400% |
| 32 | 804 | 4% | 6% | 10% | 22% | 39% | 61% | 100% | 156% | 244% | 413% | 625% | 977% | 1526% | 2197% | 3906% | 6104% | 8789% |
| 40 | 1257 | 2% | 4% | 6% | 14% | 25% | 39% | 64% | 100% | 156% | 264% | 400% | 625% | 977% | 1406% | 2500% | 3906% | 5625% |
| 50 | 1963 | 1% | 3% | 4% | 9% | 16% | 25% | 41% | 64% | 100% | 169% | 256% | 400% | 625% | 900% | 1600% | 2500% | 3600% |
| 65 | 3318 | 1% | 2% | 2% | 5% | 9% | 15% | 24% | 38% | 59% | 100% | 151% | 237% | 370% | 533% | 947% | 1479% | 2130% |
| 80 | 5027 | 1% | 1% | 2% | 4% | 6% | 10% | 16% | 25% | 39% | 66% | 100% | 156% | 244% | 352% | 625% | 977% | 1406% |
| 100 | 7854 | 0% | 1% | 1% | 2% | 4% | 6% | 10% | 16% | 25% | 42% | 64% | 100% | 156% | 225% | 400% | 625% | 900% |
| 125 | 12272 | 0% | 0% | 1% | 1% | 3% | 4% | 7% | 10% | 16% | 27% | 41% | 64% | 100% | 144% | 256% | 400% | 576% |
| 150 | 17671 | 0% | 0% | 0% | 1% | 2% | 3% | 5% | 7% | 11% | 19% | 28% | 44% | 69% | 100% | 178% | 278% | 400% |
| 200 | 31416 | 0% | 0% | 0% | 1% | 1% | 2% | 3% | 4% | 6% | 11% | 16% | 25% | 39% | 56% | 100% | 156% | 225% |
| 250 | 49087 | 0% | 0% | 0% | 0% | 1% | 1% | 2% | 3% | 4% | 7% | 10% | 16% | 25% | 36% | 64% | 100% | 144% |
| 300 | 70686 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 1% | 1% | 2% | 3% | 5% | 7% | 11% | 17% | 25% | 44% | 69% | 100% |

**Abbildung 10: Aus kritischem Pfad resultierende Maßnahmen sind auf alle anderen zu übertragen.**

[5] Es handelt sich um einen Orientierungswert!
[6] Es handelt sich um einen Orientierungswert!

# 9 Druckstoßberechnung

Druckstoßberechnung heißt: Hochfrequente Simulation (Zeitschritt 0,001 s[7]) einer plötzlichen Änderung des stationären Förderbetriebes infolge von Schalthandlungen, die zu Änderungen des Betriebsdruckes und des Fördervolumenstromes mit zum Teil sehr steilen Gradienten führen.

Dazu ist ein numerisches 1D-Knoten-Kanten-Modell zu erstellen, das alle hydraulisch relevanten Komponenten (Kanten) im Fließweg zwischen dem Start- und Zielsystem enthält, die jeweils zwischen 2 Lage-Knoten liegen: Rohre, Armaturen, Ventile, Pumpen, Rückflussverhinderer, Masse-Durchflussmesser, Behälter, …
Zudem sind dem Modell die systemrelevanten Stoffwerteeigenschaften des Mediums und die Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeiten zu hinterlegen.
Bei der Modellierung sind auch die Umlenkstellen, an denen Längskräfte aus Druckstoß wirken, als Knoten zu berücksichtigen.

Die Druck- und Durchflussänderungen werden ab Entstehungsort mit einer Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit (ca. 1.000 m/s[8]) durch das Druckleitungssystem transportiert, wobei es an Abzweigen, Nennweitenänderungen und Leitungsenden zu (Teil-) Reflexionen kommt.
Ziel der Druckstoßberechnungen ist es, rechnerisch nachzuweisen, dass es zu keinen Überschreitungen des jeweils maximal zulässigen Betriebsüberdruckes kommt. Bei rechnerischer Überschreitung des Betriebsüberdruckes sind geeignete und mit dem Betreiber abgestimmte Druckstoßsicherungsmaßnahmen zu empfehlen, zu dimensionieren und die Wirksamkeit rechnerisch nachzuweisen.

Das Programmsystem muss auch die Entstehung örtlicher und längsverteilter Dampfzonen im flüssigkeitsgefüllten Rohr korrekt berücksichtigen (wenn bei Druckabfall der Dampfdruck der Flüssigkeit erreicht wird). Nur so können gegebenenfalls entstehende Kavitationsstöße beim Wiederauflösen der Dampfzonen im Rohr korrekt berechnet werden. Die Höhe des Druckstoßes beim Auffüllen einer Dampfzone ist Berechnungsergebnis und kann sehr unterschiedlich sein (bis hin zu „druckstoßfreier Auffüllung einer Dampfzone“).

Durch Druckstöße kommt es zu in axialer Richtung wirkenden Kräften in Rohrabschnitten (Längskräften), die an Rohrkrümmern wirken (s. Abb. 11).

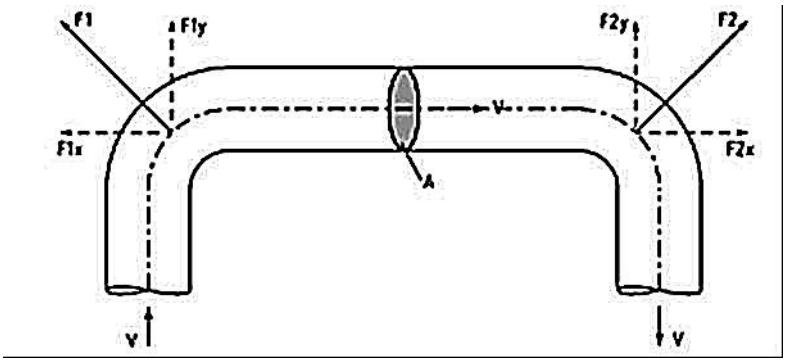



**Abbildung 11: Kräfte aus Strömungslasten an Rohrkrümmern**

[7] Es handelt sich um einen Orientierungswert für Stahlleitungen!
[8] Es handelt sich um einen Orientierungswert!

Die Entstehung von axial gerichteten Kräften kann für den in der Abbildung dargestellten Rohrleitungsabschnitt gut veranschaulicht werden. Da sich eine Druckwelle mit endlicher Geschwindigkeit (ca. 1000 m/s[9]) ausbreitet, erreicht sie die verschiedenen Krafteinleitungspunkte (am linken bzw. rechten Krümmer) zeitlich nacheinander.
Bei einer Fortpflanzung der Druckwelle, im Bild von links nach rechts, ändert sich zuerst der Druck im linken Krümmer, während die Störung den rechten Krümmer noch nicht erreicht hat. Damit wird das Gleichgewicht des horizontalen Anteils der Krümmerkräfte des zuvor herrschenden stationären Strömungszustands gestört und es entstehen dynamische, in Richtung der Rohrachse wirkende Kräfte.

Gemäß **VDI 3842** (Schwingungen in Rohrleitungssystemen, VDI Richtlinie, Juni 2004) erfolgt die Berechnung der Fluidkräfte über den Impulssatz diskretisiert über alle Rohrabschnitte:

$$\frac{dI}{dt} = \sum Kräfte$$

Betrachtet werden alle Rohrleitungsabschnitte, die durch zwei Krümmer oder Komponenten, z.B. Behälter, Pumpen, Ventile begrenzt werden. Das Medium wird im Krümmer 1 und Krümmer 2 umgelenkt. Durch diese Umlenkung ändert der Strömungsimpuls seine Richtung. Nach dem Impulserhaltungssatz muss dieser Impuls auf den Krümmer übertragen werden. Daraus ergibt sich eine Kraft auf den jeweiligen Krümmer:

$$F_{Kr1} = (p_1 + \rho_1 v_1^2) A_{Rohr} \qquad \text{bzw.} \qquad F_{Kr2} = (p_2 + \rho_2 v_2^2) A_{Rohr}$$

Weiterhin werden durch Wandreibung Kräfte auf die Rohrwand übertragen.

Auf einem Rohrleitungsabschnitt entsteht durch Reibungsverluste der Strömung ein Druckabfall $\Delta p_{Reib}$. Eine diesem Druckabfall entsprechende Kraft muss auf die Rohrwand in Strömungsrichtung übertragen werden, so dass folgt:

$$F_{Reib} = A_{Rohr} \int_0^L \frac{\lambda}{D} \frac{\rho}{2} \, v \, v \, \mathrm{d}u$$

Die Übergabe der Fluidkräfte zur Weiterverarbeitung erfolgt mit zwei unterschiedlichen Varianten.

### Variante 1

Die resultierende Fluidkraft $\Delta F$ für den Rohrleitungsabschnitt mit der Länge L wird an das Strukturanalyse-Programm übergeben. Diese Kraft wird beispielsweise am mittleren Massenpunkt im Strukturmodell des Leitungsabschnittes angesetzt (s. Abb. 13).

$$\Delta F = F_{Kr2} - F_{Kr1} + F_{Reib}$$

Im Fall einer stationären Strömung ist die resultierende Kraft auf den Rohrleitungsabschnitt gleich Null (Kräftegleichgewicht).

[9] Es handelt sich um einen Orientierungswert für Stahlleitungen!

**Variante 2**

Die Kräfte $F_{Kr1}$ und $F_{Kr2}$ werden an die Krümmer-Massenpunkte angebunden;
an den Massenpunkten längs des Leitungsabschnittes werden die Reibkraftanteile $\Delta F_{Reib}$ übertragen (s. Abb. 12).

Die Variante 2 liefert die realistischeren Ergebnisse, da die Phasenlage der Schwingungen korrekter wiedergegeben wird. Außerdem werden die inneren Kräfte der Rohrleitung durch die Berücksichtigung des Gesamtdruckes p am jeweiligen Krümmer besser simuliert.

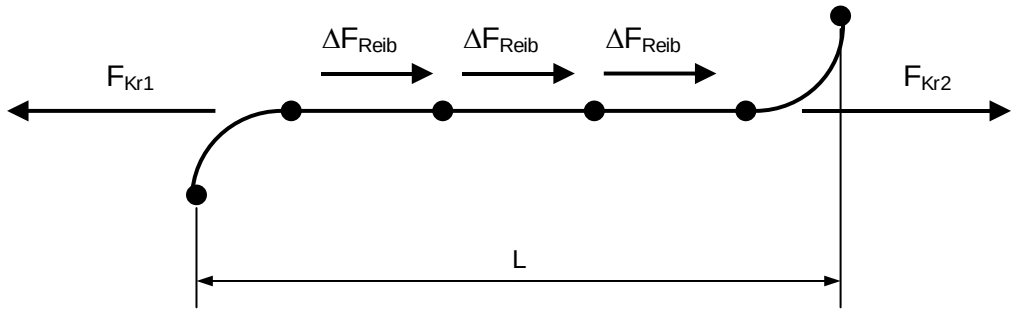



**Abbildung 12: Übergabe der Differenzkraft an das Strukturanalyseprogramm, zu Variante 2**

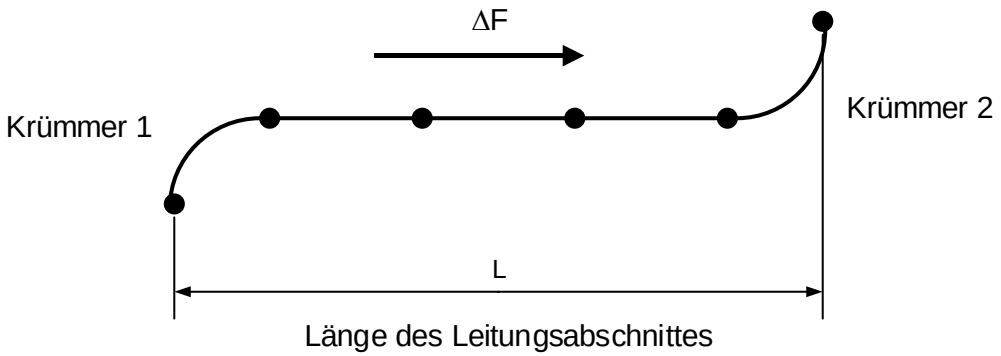



**Abbildung 13: Übergabe der Einzelkräfte an das Strukturanalyseprogramm, zu Variante 1**

**Die aus den Druckstoßberechnungen resultierenden Strömungslasten müssen anschließend zur rohrstatisch / -dynamischen Analyse, z. B. mit ROHR2 bzw. mit ROHR2stoss zur Verfügung gestellt werden** (Strömungslasten als Maximalwerte je Leitungsabschnitt bzw. als Kraft-/ Zeitverläufe).

Man bezeichnet eine solche zweistufige Berechnung als *entkoppelt*.

## 9.1 Ermittlung der relevanten Druckänderungsgeschwindigkeit

Zur Beurteilung von Kraftwirkungen aus dem Druckstoß ist primär nicht der maximale Druck maßgebend, sondern die Steilheit der Änderung des Druckes in einem Druckleitungsabschnitt. Während man die Steilheit der Druckänderung bei einem Armaturenschnellschluss über die Drosselcharakteristik der Armatur und die Schließzeit

beeinflussen kann, ist dies bei einem Pumpenausfall nur bedingt möglich (-> Erhöhung Trägheitsmoment).

Der Ausfall einer Kreiselpumpe führt zu einer typischen maximalen Druckänderung von dp/dt = -0,5 bar in 0,01 s. Daraus lässt sich folgender normierter Gradient ableiten:

→ 50 bar/s[10]
als normierte maximale Steilheit der Druckänderung (-> 0,5bar/0,01s),
die sich mit Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit von etwa 1000 m/s[11] im System ausbreitet, dies entspricht einer Druckdifferenz von 0,05 bar/m in der Rohrleitung (-> 50bar/s/1000m/s)

## 9.2 Ermittlung der resultierenden Kräfte aus Druckstoß

Eine erste Abschätzung einer Kraftwirkung aus Druckstoß in einem z. B. 50 m langen Leitungsabschnitt DN150 zwischen zwei Umlenkstellen (z. B. Rohrleitung auf Brücke) ist so möglich:

→ 2,5 bar maximales Druckungleichgewicht im Leitungsabschnitt (50 m x 0,05 bar/m) entspricht 0,25 N/mm²
→ 19.931 mm² Fließquerschnitt (DN150 mit 159,3 mm Innendurchmesser)
4.983 N Kraftwirkung aus Druckstoß
ca. 5 kN[12]

Diese Druckstoßkraft kann mit der möglichen Kraftaufnahme eines Festpunktlagers (maximal zulässige Belastungen) verglichen werden.

Dieses Verfahren wird im Short Cut Verfahren „Waage“ eingesetzt.

[10] Es handelt sich um einen Orientierungswert!
[11] Es handelt sich um einen Orientierungswert!
[12] Beachte dazu: Anhang: Bewertung in Kategorie II (Bewertungsgröße GII)

# 10 Erstellung von Berichten

Ergebnisse aus Druckstoßbetrachtungen müssen so zusammengefasst werden, dass eine ausreichende, nachvollziehbare aber auch in ihrem Umfang beherrschbare Dokumentation entsteht. Die Dokumentation muss für einen Dritten, der die Überlegungen und Berechnungen nicht durchgeführt hat, nachvollziehbar sein. Die Erfahrung zeigt, dass es im Rahmen einer effizienten Projektbearbeitung oft sinnvoll ist mit Zwischenberichten (siehe 10.1) und einem abschließenden Abschlussbericht (siehe 10.3) zu arbeiten.

## 10.1 Zwischenbericht erstellen

Der Zwischenbericht dient dem Abgleich zwischen Druckstoßanalyse (Berechner) und Betreiber.

Die Ergebnisse der Druckstoßanalyse müssen mit dem Betreiber des Rohrleitungssystems im Detail besprochen werden. Ebenso sollten die aus der Analyse abgeleiteten Abhilfemaßnahmen zusammen mit dem Betreiber auf Möglichkeiten zur Umsetzung überprüft werden. Dazu ist ein gemeinsames Verständnis darüber unabdingbar, welches Rohrleitungssystem hinsichtlich welcher Szenarien unter Berücksichtigung welcher Randbedingungen analysiert wurde. Um dieses gemeinsame Verständnis zwischen dem Ausführenden der Druckstoßanalyse und dem Betreiber zu erreichen, wird empfohlen, einen Zwischenbericht zu erstellen und diesen dem Betreiber vorab zukommen zu lassen.

Ein solcher Zwischenbericht sollte mindestens die folgenden Punkte beinhalten:

- eine kurze Beschreibung des betrachteten Rohrleitungssystems inklusive der bei der Analyse berücksichtigten Systemeigenschaften (siehe Abschnitt 4)
- die verwendeten Stoffdaten (siehe Abschnitt 5)
- eventuell getroffene Annahmen (siehe Abschnitt 7)
- die betrachteten Szenarien (siehe Abschnitt 6)
- die wesentlichen Ergebnisse (berechnete Maximaldrücke, resultierende Kräfte auf die Struktur, identifizierte Szenarien für unzulässige Druckstöße und Kondensationsschläge)
- die empfohlenen Abhilfemaßnahmen (erforderliche Armaturen-Schließzeiten, empfohlene An- und Abfahrprozeduren für Pumpen, Notwendigkeit zur Installation von Hydrospeichern und gegebenenfalls berechnetes Mindestvolumen eines solchen, etc.)

Aus der Diskussion des Zwischenberichts mit dem Betreiber erwächst nicht selten die Notwendigkeit, Teile der Druckstoßanalyse revidieren oder ergänzen zu müssen.

Der Zwischenbericht dient dabei auch der systematischen Identifikation der zu überarbeitenden Teile der Druckstoßanalyse.

Sind alle getroffenen Annahmen zwischen Betreiber und Berechner akzeptiert, kann der Zwischenbericht als Abschlussbericht genutzt werden.

## 10.2 Annahmen mit Betreiber abgleichen

Erfahrungsgemäß ergeben sich aus der Ergebnisdiskussion bzw. der Abstimmung mit dem Betreiber Aspekte, die bei der ersten Analyse nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt wurden. Der Grund dafür kann z. B. darin liegen, dass bestimmte Aspekte anfangs entweder für nicht relevant gehalten und deshalb nicht weitergegeben wurden oder schlichtweg noch nicht bekannt waren.

Einige Beispiele für solche Fälle sind im Folgenden stichpunktartig aufgeführt:

### 10.2.1 Annahmen

- **Pumpen**
  Das Rohrleitungssystem kann mit mehreren Pumpen versorgt werden, die unterschiedliche Kennlinien aufweisen. Die Druckstoßanalyse wurde nur für eine Pumpe durchgeführt. Die Pumpenkennlinien der bisher nicht berücksichtigten Pumpen haben aber einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Ergebnisse. Auch das Vorhandensein oder Fehlen von Rückschlagarmaturen auf der Pumpendruckseite kann eine Neuberechnung erforderlich machen.

  **Frequenzumrichter**
  Die oder eine Pumpe wird geregelt mit Frequenzumrichter (FU) betrieben, so dass die Fördermenge und Förderhöhe kleiner sind.
  Zudem besteht so die Möglichkeit, die Pumpe per FU angepasst langsam zu starten und zu stoppen.

- **Nenndruckstufe im Start- und/oder Zielsystem (RidA[13]-Bereich)**
  Nicht selten kommt es vor, dass das Transportleitungssystem (RadA[14]-Bereich) einer höheren Nenndruckstufe genügt als die Leitungen im RidA-Bereich. Da für den RidA-Bereich anfangs oftmals keine detaillierten Angaben zur Verfügung stehen, werden Annahmen gemacht, die sich in der Abstimmung als falsch erweisen (siehe Kapitel 7).

- **Einbauten im Start- und/oder Zielsystem (RidA-Bereich)**
  Im RidA-Bereich gibt es (zunächst nicht berücksichtigte) massenstrombegrenzende Einbauten, z. B. Blenden oder Regelventile, die den in der Analyse zugrunde gelegten Massenstrom gar nicht zulassen. Nicht selten sind im RidA-Bereich auch deutlich geringere Nennweiten verbaut als im Transportleitungssystem (auf der Rohrbrücke). In solchen Fällen ist es häufig auch hilfreich, nach Messdaten aus Betriebsdatenerfassungssystemen (z. B. von Durchflussmessungen) zu fragen.

- **Höhenniveaus im Start- und/oder Zielsystem (RidA-Bereich)**
  Große Höhenunterschiede im RidA-Bereich erweisen sich bei genauerer Betrachtung der Szenarien als relevant, z. B. bei der Beurteilung, ob Leitungsabschnitte leerlaufen

[13] Rohrleitung innerhalb der Anlage
[14] Rohrleitung außerhalb der Anlage

können und somit stationäre Dampfblasen vorliegen könnten (Potenzial für Kondensationsschläge!).

- **Temperaturabhängigkeit von Stoffdaten**
  Die Stoffdaten des Fördermediums sind in vielen Fällen stark abhängig von der Temperatur. Da die Relevanz dieser Daten für die Druckstoßanalyse nicht immer allen Betreibern bewusst ist, werden häufig zunächst nur überschlägige, teilweise für andere Temperaturen geltende Werte, angegeben. Je nachdem, welche Konsequenzen sich aus der Druckstoßanalyse ergeben, kann es durchaus Sinn machen, genauere Stoffdaten anzufragen bzw. ermitteln zu lassen.
  Während sich Angaben zu Dichten, Dampfdrücken und Viskositäten für die meisten Medien häufig noch in der Literatur finden, sind Angaben zur Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit deutlich schwieriger zu bekommen. Hier hilft gelegentlich eine messtechnische Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mittels einer Ultraschallmessung unmittelbar an der Rohrleitung („Clamp-On“-Messtechnik), aus der dann die Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit ermittelt werden kann.

### 10.2.2 Diskussion von Abhilfemaßnahmen

Es kommt gelegentlich auch vor, dass die aus der Analyse abgeleiteten Abhilfemaßnahmen in der empfohlenen Form nicht oder nur unter großem Aufwand umsetzbar sind.

Häufiger vorkommende Beispiele sind (vgl. auch Kap. 6.1 – 6.7):

- **Realisierbare Armaturen-Schließzeiten**
  In der Druckstoßanalyse ermittelte Armaturen-Schließzeiten sind so lang, dass sie mit den üblichen Mitteln (z. B. mechanische Drosseln in der Ab- oder Zuluft bei pneumatischen Armaturenantrieben) nicht mehr realisierbar sind.

- **Drosselverhalten von Armaturen**
  Im Fall von pneumatisch schließenden Armaturen, deren Schließzeit mit einer Abluftdrossel eingestellt wird, besteht die Gefahr, dass die Armatur von der Strömung im letzten Teil des Schließprozesses schlagartig zugedrückt wird, obwohl die Gesamtschließzeit zur Vermeidung von Druckstößen ausreichend bemessen ist. Trotz großer Gesamtschließzeit treten dann Druckstöße und Kavitationsschläge auf. Abluftdrosseln sind daher zur Druckstoßdämpfung nur bedingt und armaturentypabhängig (z. B. bei Schiebern, Kugelhähnen) einsetzbar.

- **Schließzeiten Verfahrens- und Sicherheitstechnik**
  Schließzeiten können manchmal auch aus verfahrenstechnischen oder aus sicherheitstechnischen Aspekten heraus nicht verlängert werden, obwohl das gemäß Druckstoßanalyse notwendig wäre.
  Klassische Beispiele hierfür sind die bewusst kurz gewählten Schließzeiten von Armaturen an Fass-, Tank- und Kesselwagen-Abfüllstationen oder an Schiffsverladearmen mit dem Ziel, die in die Umwelt austretende Menge im Falle einer Havarie möglichst gering zu halten. Auch bei Dosierventilen an Reaktoren ist eine Veränderung der Schließzeit oftmals nicht realisierbar, weil damit die Genauigkeit von Dosierungen beeinflusst wird.

In solchen Fällen muss nach anderen Lösungen gesucht werden.

- **Hydrospeicher**
  Hydrospeicher sind in einigen Fällen nicht einsetzbar, weil sie einen nicht oder nur unzureichend durchflossenen Raum darstellen. Das kann bei Fördermedien, die zu Polymerisation neigen, problematisch sein und eine Verwendung ausschließen. Insbesondere bei Blasen- oder Membranspeichern ist es in manchen Fällen sehr schwierig, ein für das Fördermedium geeignetes, beständiges Elastomer-Material für die Blase/Membran zu finden.

- **Bestandssysteme mit geringem Nenndruck**
  Insbesondere bei Bestandssystemen mit einem geringen Nenndruck (z. B. PN 10) sind die Druckstöße nur mit erheblichem technischen und organisatorischen Aufwand so weit zu verringern, dass keine unzulässigen Drücke auftreten können. In einigen wenigen Fällen kann aber ein solches System mit verhältnismäßig geringem Aufwand für einen höheren Nenndruck ertüchtigt werden, z. B. dann, wenn lediglich einige wenige Flansche oder nur ein einzelnes Messgerät oder eine Armatur ausgetauscht werden muss.
  Es wird an dieser Stelle empfohlen, auch eine solche Lösung zumindest in Betracht zu ziehen bzw. zu hinterfragen.

- **„Betreibererfahrungen“**
  Ein nicht zu vernachlässigender Punkt beim Abgleich der Annahmen und Systemeigenschaften ist der der vielzitierten „Betreibererfahrungen“.
  Viele Rohrleitungssysteme sind seit vielen Jahren ohne Probleme im Einsatz, obwohl aus der Druckstoßanalyse Hinweise erwachsen, dass Maßnahmen für ein sicheres Betreiben notwendig wären. Diese Betreibererfahrungen helfen sehr häufig dabei, die Gründe zu identifizieren, die zu dieser Abweichung zwischen Druckstoßanalyse und Realität führen. In einigen Fällen kann dies dazu führen, dass ursprüngliche Annahmen für die Analyse modifiziert werden müssen, in anderen Fällen führt die Betrachtung aber auch lediglich zu dem Schluss, dass die bewusst konservativ gewählten Annahmen in dieser Form in der realen Anlage noch nie vorgekommen sind, aber dennoch nicht ausgeschlossen werden können.

### Abgleich zwischen Betreiber und Berechner

Schlussendlich führt der Abgleich zwischen Betreiber und demjenigen, der die Druckstoßanalyse durchgeführt hat, zu einer Entscheidung über das weitere Vorgehen.

- Entweder die im Zwischenbericht dokumentierte Druckstoßanalyse ist vollständig, in sich schlüssig und die vorgeschlagenen Maßnahmen sind umsetzbar oder aber
- die Druckstoßanalyse muss revidiert bzw. ergänzt werden.

Im ersten Fall kann der Zwischenbericht als Abschlussbericht gelten, im zweiten Fall wird eine weitere „Iterationsschleife“ mit einem neuen Zwischenbericht und einem erneuten Abgleich erforderlich.

## 10.3 Abschlussbericht erstellen

Druckstoßbetrachtungen sind besonders in Netzen komplex.

Es ist immer die Vorgehensweise zu erläutern. Dies beinhaltet zum Beispiel die Begründungen warum der gewählte Weg (siehe Kap. 12.7) gewählt wurde. Die einzelnen Wegpunkte können als Überschriften dienen, die im Folgenden näher erläutert und begründet werden.

In einem Kurzbericht sollten die Berechnungsergebnisse (z. B. Waage) sowie eine Begründung für die getroffenen Annahmen angeführt werden. Vergleiche hierzu Kap. 12.5.

In einem Langbericht sind die Ergebnisse aus den Druck- und Kraftergebnissen zusammenzufassen. Vergleiche hierzu Kap. 12.6.

# 11 Beurteilung von Ergebnissen

## 11.1 Beurteilung der Druckergebnisse

Grundsätzlich ist sicher zu stellen, dass die bei einem Druckstoß entstehenden Drücke unterhalb der max. zulässigen Drücke der relevanten drucktragenden Teile (z. B. Rohrwandung, Armaturengehäuse, Pumpengehäuse, sonstige Ausrüstungsteile) liegen. Im Einzelfall kann eine Drucküberschreitung von max. 10% zugelassen werden. Dies begründet sich mit der Tatsache, dass eine Druckspitze in der Regel nur wenige Millisekunden andauert. Dieses Vorgehen erfolgt in Anlehnung an den Anhang I der DGRL, vgl. dazu Anhang I der DGRL Nummer 2.11.2 in Kombination mit 7.3.

## 11.2 Beurteilung der Kräfteergebnisse

Die Beurteilung der Kräfte in einem Rohrleitungssystem kann zum einen mit einem vereinfachten Ansatz, zum anderen detailliert mit einem Rohrstatik-Programm erfolgen. Mit dem vereinfachten Ansatz (Wärmeausdehnung + Kraft aus der Druckstoßberechnung) kann durch konservative Abschätzung die Einwirkung auf die Festpunkte / Lospunkte bestimmt werden[15]. Für eine detaillierte Bewertung muss das gesamte Rohrleitungssystem in einem Rohrstatik-Programm (Stichwort: Ermittlung einer statischen Ersatzlast) dargestellt und bewertet werden.

### Kraftreserven im Rohrleitungssystem

Um die Auswirkungen der Kräfte, die durch einen Druckstoß entstehen, auf eine Rohrleitung beurteilen zu können, ist zu berücksichtigen, dass Rohrleitungen schon durch die Betriebsparameter (Druck, Temperatur) einer gewissen Belastung ausgesetzt sind. Somit kann es erforderlich sein, dass die Betriebslasten mit denen der Druckstoßlasten überlagert werden müssen. Der anzuwendende Sicherheitsfaktor für die Druckstoßlasten hängt davon ab, ob ein Betriebsfall oder ein Sonderfall vorliegt. Ein Sonderfall nach AD2000 Merkblatt S3/0 ist ein Ereignis, bei deren Eintritt der Betrieb der Rohrleitung aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann, der aber im Falle des Eintritts beherrscht werden muss. Bei einem Sonderfall reduziert sich der anzuwendende Sicherheitsfaktor. Ob ein Sonderfall vorliegt, ist im Rahmen von Sicherheitsgesprächen zu ermitteln.

### Bewertung der Kraftaufnahme durch Festpunkthalterungen

Die rechnerisch ermittelten Kraftwirkungen sind mit den potenziell durch Festpunkthalterungen aufnehmbaren Kräften zu vergleichen und zu bewerten. Die Kraftaufnahmen der Festpunkthalterungen können sich aus entsprechenden Herstellerangaben ableiten lassen oder können – z. B. im Falle eigener Konstruktionen – berechnet werden. In beiden Fällen lassen sich die möglichen Kraftaufnahmen durch Erfahrungen aus praktischen Versuchen untermauern. So zeigte sich zum Beispiel in einer praktischen Versuchsreihe, in der Festpunkthalterungen (Klemmhalterungen mit 2 oder 4 Rohrschellen; Siehe Abbildung 14: Beispiele einer "2-Punkthalterung" und einer "4-

[15] Der Einfluss von Fluid-Struktur-Wechselwirkungen („FSI“) wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt!

Punkthalterung") hinsichtlich ihrer Kraftaufnahme sowohl in statischer als auch in dynamischer Hinsicht untersucht wurden, dass die tatsächliche Fähigkeit zur Aufnahme von Kräften deutlich höher lag als durch Berechnungen zu erwarten gewesen wäre. Ursachen für diese Abweichung können in der Wahl von Werkstoffen, in der tatsächlichen Ausführung der Konstruktion (z. B. Dicke einer Schweißnaht) oder in unterschiedlichen Randbedingungen zwischen Theorie und Praxis liegen (wenn in der Praxis auch Verformungen im teil-plastischen Bereich (anfängliches Fließen) zugelassen werden). Sollte der Abgleich zwischen Kraftwirkung und Kraftaufnahme eine Aufnahme im Grenzbereich der Festpunkthalterung zeigen, können die praktischen Erfahrungen zur Schaffung zusätzlicher Sicherheiten herangezogen werden. Sie können auch als Grundlage dienen, dass einzelne Festpunkthalterungen individuell bewertet werden, z. B. in dem die o.g. Ursachen für Abweichungen bei einer spezifischen Berechnung berücksichtigt werden (Werkstoffe und Schweißnähte anhand ihrer tatsächlichen Ausfertigung).

**Abbildung 14: Beispiele einer "2-Punkthalterung" und einer "4-Punkthalterung"**

# 12 Anhang

## 12.1 Joukowski-Abschätzung

Die maximale Druckänderung aufgrund des Druckstoßes beim Schließen einer Armatur kann überschlägig mit der Joukowski-Formel ermittelt werden:

$$\Delta p = \pm\, \rho \cdot \Delta v \cdot \mathrm{a}$$

| | |
|---|---|
| *Δp [N/m²]* | *Druckänderung durch Druckstoß ($1 \cdot 10^5$ N/m² entspricht 1 bar)* |
| *ρ [kg/m³]* | *Dichte der Flüssigkeit* |
| *vA [m/s]* | *Strömungsgeschwindigkeit in der Rohrleitung* |
| *vE [m/s]* | *Fließgeschwindigkeit nach dem Schließen der Armatur (i. d. R. = 0)* |
| *ṁ [t/h]* | *Massenstrom der Flüssigkeit* |
| *Δv [m/s]* | *Änderung der Strömungsgeschwindigkeit Δv = vA - vE* |
| *a [m/s]* | *Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit (in erster Näherung kann die Schallgeschwindigkeit des Fördermediums verwendet werden, z. B. a=1500 m/s für Wasser und viele organische Verbindungen)* |

$$vA = \frac{\frac{\dot{m}}{3{,}6}}{\rho \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{di}{1000}\right)^2}$$

Diese Druckerhöhung nach Joukowski tritt allerdings nur dann auf, wenn die Schließzeit der Armatur kürzer oder höchstens gleich der sogenannten Reflexionszeit für die Druckwelle ist, die sich aus der Leitungslange L, durch die die Druckwelle bis zur Reflexionsstelle läuft und der Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit a berechnen lässt:

$$T_R = \frac{2 \cdot L}{a}$$

Ist die Schließzeit länger als die Reflexionszeit, dann reduziert sich der Druckstoß. Aus diesem Grund ist eine Verlängerung der Schließzeit häufig ein probates Mittel, um Druckstoßprobleme zu vermeiden. Wenn es gelingt, die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Schließzeit der Armatur <u>linear</u> vom Ursprungswert auf null zu reduzieren, dann kann die “modifizierte” Joukwskigleichung Anwendung finden:

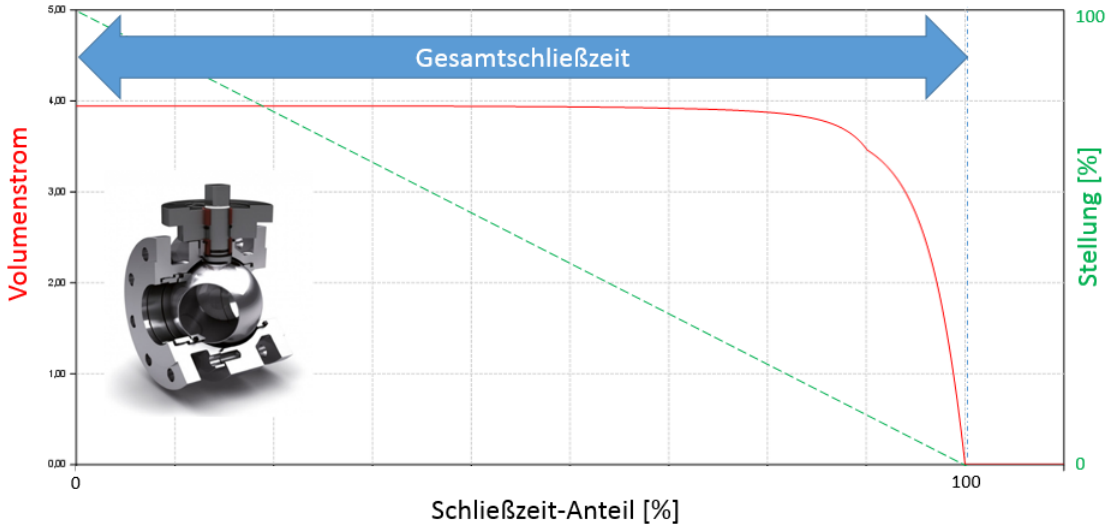
$$\Delta p = \pm\, \rho \cdot \Delta v \cdot \mathrm{a} \cdot \frac{T_R}{T_S}$$

Das bedeutet theoretisch, dass das Schließen einer Armatur mit einer Schließzeit, die doppelt so lang ist wie die Reflexionszeit, zu einer Druckerhöhung führt, die nur halb so groß ist wie der Druckstoß nach der Joukowskiformel. In der Praxis ist hier allerdings höchste Vorsicht geboten, denn die Voraussetzung für die Anwendung der modifizierten Joukwski-formel, ist, wie bereits oben erwähnt, ein lineares Reduzieren der Strömungsgeschwindigkeit

während der Schließzeit. Das gelingt allerdings nur mit Armaturen, deren Armaturenkennlinie “linear” ist, wie es z. B. bei einigen Regelventilen der Fall ist. Sehr häufig hat man es aber mit “AUF”-“ZU”-Armaturen wie Kugelhähnen oder Klappen zu tun, deren Kennlinie stark nicht-linear ist. Mit solchen Armaturen erreicht man im Normalfall keine lineare Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit und kann deshalb die modifizierte Jouwskiformel eigentlich nicht anwenden. Man behilft sich deshalb eines Schließzeitkorrekturfaktors x, der den Anteil des linearen Teils an der Gesamtkennlinie beschreibt.

$$\Delta p = \pm\, \rho \cdot \Delta v \cdot \mathrm{a} \cdot \frac{T_R}{x \cdot T_S}$$

Für ein Regelventil mit linearer Kennlinie ist der Faktor x deshalb gleich 1 zu setzen. Das bedeutet letztendlich, dass über 100% des Stellwinkels/Hubes eine lineare Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit erreicht wird. Bei einem Kugelhahn kann man davon ausgehen, dass über 90% der Drehbewegung nur eine vernachlässigbare Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit erreicht wird. Erst in den letzten 10% der Drehbewegung erfolgt eine (näherungsweise lineare) Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit (siehe Abbildungen unten). Deshalb ist der Faktor für einen Kugelhahn auf 10%, also x=0,1 zu setzen.



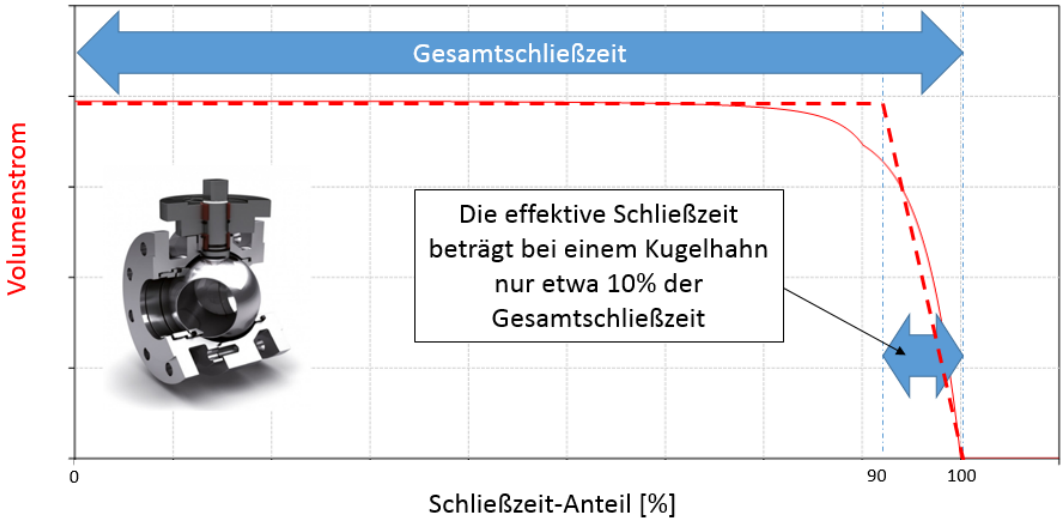



**Abbildung 15: effektive Schließzeit eines Kugelhahns**

Durch Einsetzen der Formel für die Reflexionszeit in die modifizierte Joukowskigleichung mit dem Schließzeitkorrekturfaktor erhält man letztendlich:

$$\Delta p = \pm\, \rho \cdot \Delta v \cdot \frac{2 \cdot L}{x \cdot T_S} \quad \text{für} \quad T_S > \frac{T_R}{x}$$

$$\Delta p = \pm\, \rho \cdot \Delta v \cdot \mathrm{a} \quad \text{für} \quad T_S < \frac{T_R}{x}$$

Für Armaturen, die weder eine lineare Kennlinie noch eine Kugelhahn-Kennlinie aufweisen, kann man den Schließzeitkorrekturfaktor x näherungsweise aus der Armaturenkennlinie ableiten, in dem man den Anteil des linearen Verlaufs abschätzt.

## 12.2 Erläuterung des „Waagen“-Modells und Beispiel

Das „Waagen“-Modell soll möglichst allen relevanten Parametern Rechnung tragen und so dem Anwender die Entscheidung erleichtern, ob ein Rohrleitungssystem anhand eines Simulationsmodells detailliert betrachtet werden muss oder nicht.

Dazu werden positive Einflüsse gegenüber negativen Einflüssen in vier Kategorien, die die Grundrisiken für Druckstöße in einem Rohrleitungssystem darstellen, „aufgewogen“ und zu einer Gesamtbewertung (Bewertungsgröße $G_{Gesamt}$) zusammengeführt. Dies geschieht anhand eines Bonus-Malus-Systems. Negative Einflüsse bezüglich der Druckstoßthematik werden mit Minuspunkten bewertet, positive Einflüsse werden mit Pluspunkten berücksichtigt. Eine neutrale Bewertung würde demnach einer Punktzahl von null entsprechen.

$$G_{Gesamt} = G_I + G_{II} + G_{III} + G_{IV}$$

Um zu der Gesamtbewertung $G_{Gesamt}$ zu kommen, müssen zunächst die Grundrisiken in den Kategorien I bis IV einzeln bewertet werden. Daraus ergeben sich die Bewertungsgrößen $G_I$, $G_{II}$, $G_{III}$ und $G_{IV}$, die, jede für sich, einen positiven, einen neutralen oder einen negativen Wert aufweisen kann.

Ergeben sich für $G_{Gesamt}$ positive Werte, dann spricht das dafür, dass auf eine detaillierte numerische Simulation eher verzichtet werden kann, während negative Werte für eine Betrachtung des Rohrleitungssystems anhand einer numerischen Simulation sprechen.

Allerdings sollte eine numerische Simulation auch dann in Betracht gezogen werden, wenn eine oder mehrere Bewertungsgrößen der Einzelkategorien stark negative Werte hervorbringen.

Bewertung in Kategorie I (Bewertungsgröße $G_I$):

Hier wird das Risiko, dass der Druck durch einen Druckstoß den zulässigen Druck übersteigt, bewertet.

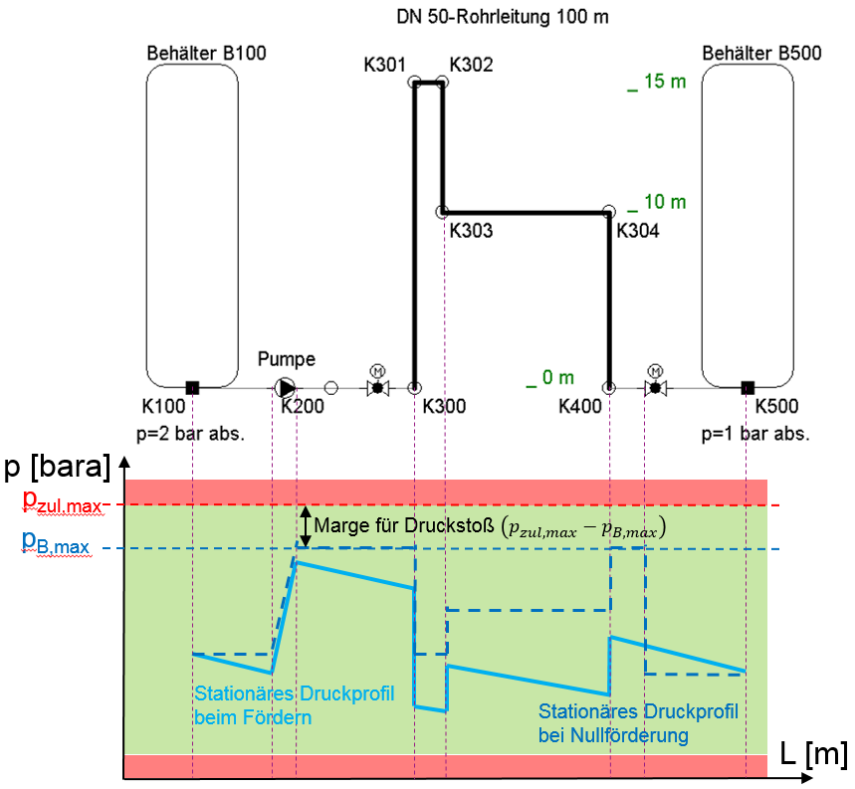



**Abbildung 16: Gefährdung durch Überschreitung des zulässigen Drucks**

Zur Bewertung werden die folgenden Parameter benötigt:

| | |
|---|---|
| $\Delta p$ | abgeschätzte maximale Druckänderung durch den Druckstoß (z.B. nach Joukowski-Formel oder modifizierter Joukowski-Formel) |
| $p_{zul}$ | maximal zulässiger Druck (z. B. Absicherungsdruck) |
| $p_{Bmax}$ | maximaler (stationärer) Betriebsdruck (z. B. Nullförderdruck der Pumpe) |

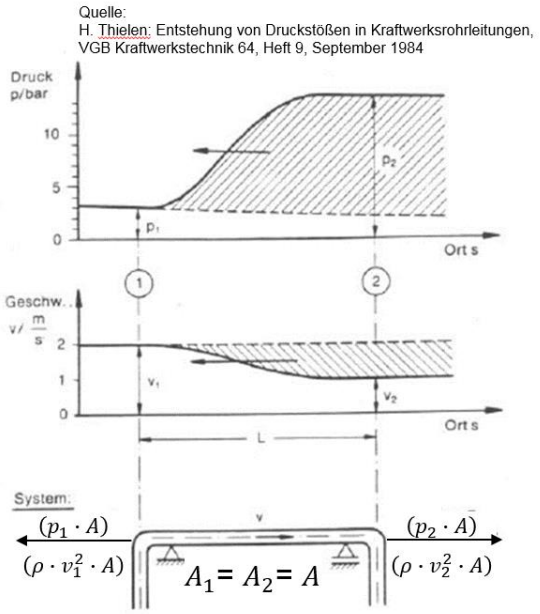
Zunächst wird das Verhältnis gebildet aus dem abgeschätzten Druckstoß $\Delta p$ und der Differenz zwischen dem maximal zulässigem Druck $p_{zul}$ und dem maximalem Betriebsdruck $p_{Bmax}$. Liegt dieses Verhältnis über dem Wert 1, können Druckstöße auftreten, die größer sind als der maximal zulässige Druck. In der untenstehenden Formel für $G_I$ ergeben sich dann negative Werte für den Term in eckiger Klammer. Verhältniswerte unter 1 stehen für Druckstöße, deren Maximalwerte kleiner sind als der maximal zulässige Druck. Hierfür ergeben sich positive Werte für den Term in eckiger Klammer. Dieser Term wird mit einem Gewichtungsfaktor $F_I$ multipliziert und ergibt so die Bewertungsgröße $G_I$ in Kategorie I.

$$G_I = F_I * \left[1 - \frac{\Delta p}{(p_{zul} - p_{Bmax})}\right]$$

Die Festlegung des Gewichtungsfaktors $F_I$ obliegt dem Anwender und erfolgt individuell in Relation zu den Gewichtungsfaktoren der anderen drei Kategorien. Dadurch wird eine Gewichtung des Risikos nach Kategorie I gegenüber den Risiken nach Kategorie II, III oder IV vorgenommen.

Bewertung in Kategorie II (Bewertungsgröße $G_{II}$):

Hier wird das Risiko, dass die durch Druckstöße oder Kondensationsschläge auftretenden Kräfte die zulässigen Kräfte übersteigen, bewertet.




$$F_{ax} = -\left(p_1 \cdot A + \rho \cdot v_1^2 \cdot A\right) + \left(p_2 \cdot A + \rho \cdot v_2^2 \cdot A\right)$$

$$F_{ax} \approx \left(p_2 - p_1\right) \cdot A$$

**Abbildung 17: Gefährdung durch Überschreitung zulässiger Axialkräfte[16]**

Zur Bewertung werden die folgenden Parameter benötigt:

| | |
|---|---|
| $D_I$ | Innendurchmesser der Rohrleitung |
| $t_S$ | Armaturenschließzeit (ohne Totzeit, reine Laufzeit) |
| a | Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit |
| L | längste gerade Rohrlänge im System |
| DLF | dynamischer Lastfaktor |

Die dynamischen Kräfte im Rohrleitungssystem sind abhängig von den Druckgradienten, also den Änderungen des Druckes in einem bestimmten Zeitintervall.

[16] Reibkräfte werden vernachlässigt

Der durch ein Schließen einer Armatur hervorgerufene Druckgradient kann dabei abgeschätzt werden durch die maximale Druckänderung aus dem Druckstoß Δp (siehe Kategorie I) und der Schließzeit der Armatur. Bei stark nichtlinearen Armaturenkennlinien (wie z. B. bei Kugelhähnen oder Klappen) ist nur der effektiv wirksame Zeitanteil der Schließzeit (z. B. x=0,1) zu berücksichtigen, bei Armaturen mit linearer Charakteristik kann die gesamte Schließzeit (x=1) angesetzt werden.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_1 = \left|\frac{\Delta p}{x \cdot t_S}\right|$$

Der so ermittelte Druckgradient muss aber nicht zwangsläufig der größte, durch instationäre Vorgänge hervorgerufene Druckgradient sein. Auch ein Pumpenausfall kann hohe (negative) Druckgradienten hervorrufen. Da die analytische Abschätzung des maximalen Druckgradienten beim Pumpenausfall schwierig ist, kann man hier einen Orientierungswert von etwa –50 bar/s (siehe Kap. 9.1) ansetzen, wenn keine Messwerte bekannt sind.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_2 = \left|-50\ \frac{bar}{s}\right|$$

Der für die Abschätzung der maximalen dynamischen Kräfte heranzuziehende Druckgradient ist das Maximum dieser beiden Druckgradienten.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = \max\left(\left(\frac{dp}{dt}\right)_1, \left(\frac{dp}{dt}\right)_2\right)$$

Aus der Division des maximalen Druckgradienten $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$ durch die Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit *a* wird der normierte Druckanstieg pro Meter Rohrleitung berechnet.

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_{norm} = \frac{\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}}{a}$$

Durch Multiplikation dieses Wertes $\left(\frac{dp}{dx}\right)_{norm}$ mit der längsten geraden Rohrlänge *L* erhält man das maximale Druckungleichgewicht, welches auf diesen längsten Abschnitt wirkt.

$$\Delta p_{max} = \left(\frac{dp}{dx}\right)_{norm} \cdot L$$

Dieses Druckungleichgewicht (Druckdifferenz $\Delta p_{max}$) wird mit dem Rohrquerschnitt multipliziert. Daraus ergibt sich die Axialkraft aus den Druckkräften, die auf diesen Rohrabschnitt wirkt.

Hinweis: Impulskräfte sind in der Regel um Größenordnungen geringer und werden deshalb ebenso wie Reibkräfte in dieser Abschätzung vernachlässigt.

$$F_{ax} = \Delta p_{max} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2$$

Die so ermittelte Druckkraft ist eine quasistatische Kraft. Es ist bekannt, dass ein kurzzeitig auftretender Druckstoß unter bestimmten Umständen dynamische Kräfte hervorrufen kann, die deutlich größer sind als diese quasistatische Kraft[17]. Dies wird in der Literatur mit dem sogenannten „dynamischen Lastfaktor“ DLF berücksichtigt. Für eine detaillierte Beschreibung des DLF wird auf weiterführende Literatur verwiesen.

$$F_{ax,dyn} = DLF \cdot F_{ax}$$

Ein guter **Anhaltswert** ist hierbei DLF=2.

Die so ermittelte dynamische Axialkraft muss mit den zulässigen Werten der verbauten Rohrhalterungen verglichen werden, die diese Kräfte aufnehmen müssen. Da die zulässigen Werte im Rahmen einer ersten Abschätzung nicht immer bekannt sind, werden folgende Nennweiten-abhängige Orientierungswerte vorgeschlagen. An dieser Stelle sei allerdings darauf hingewiesen, dass die genannten Werte nicht zwangsläufig als konservativ angesehen werden können. Sie dienen lediglich einer **groben Einschätzung** und müssen im Zweifelsfall überprüft werden.

| Nennweite | $F_{ax,dyn,zul}$ |
|---|---|
| ≤ DN 80 | 15 kN |
| > DN 80, ≤ DN 150 | 25 kN |
| ≥ DN 200 | 32 kN |

Die Bewertung in der Kategorie II ergibt sich dann wie folgt:

$$G_{II} = F_{II} * \left[1 - \frac{F_{ax,dyn}}{F_{ax,dyn,zul}}\right]$$

Die Festlegung des Gewichtungsfaktors $F_{II}$ obliegt dem Anwender und erfolgt individuell in Relation zu den Gewichtungsfaktoren der anderen drei Kategorien. Dadurch wird eine

[17]…insbesondere in der direkten Umgebung des Rohrleitungsabschnittes, in dem der Druckstoß / insbesondere *Kondensationsschlag* auftritt. Mit zunehmender Entfernung wird die Last durch Reibung in den Halterungen gedämpft. Im Zweifelsfall folge man den Empfehlungen aus Kap.9, Variante 2, und aus Kap. 11.2.

Gewichtung des Risikos nach Kategorie II gegenüber den Risiken nach Kategorie I, III oder IV vorgenommen.

Bewertung in Kategorie III (Bewertungsgröße $G_{III}$):

Hier wird das Risiko bewertet, dass sich bei fehlendem Druckerzeuger (abgestellter Pumpe) eventuell stationäre Dampfblasen an den Hochstellen des Rohrleitungssystems ausbilden, und somit potenziell Kondensationsschläge auftreten können.

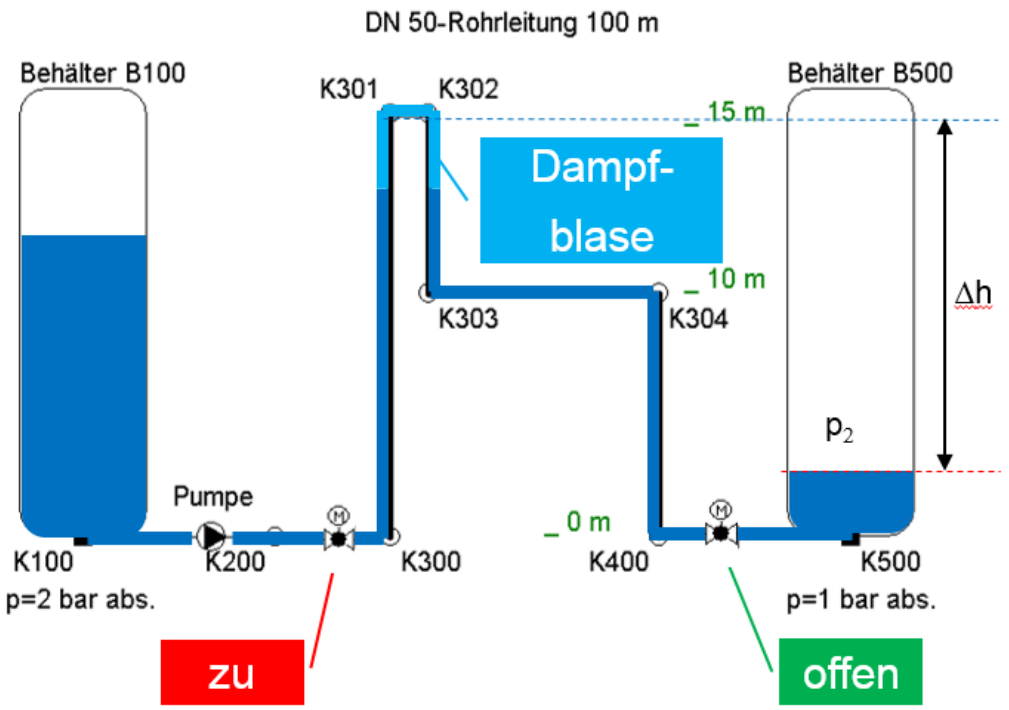



**Abbildung 18: Gefährdung durch Bildung von stationären Dampfblasen**

Zur Bewertung werden die folgenden Parameter benötigt:

| | |
|---|---|
| $\rho$ | Dichte des Fördermediums |
| $p_D$ | Dampfdruck des Fördermediums |
| $h_H$ | geodätische Höhe des Hochpunktes im Leitungssystem |
| $h_T$ | geodätische Höhe des tiefsten Punktes im Leitungssystem, an dem das Fördermedium ausfließen könnte |
| $p_T$ | Druck am tiefsten Punkt im Leitungssystem, an dem das Fördermedium ausfließen könnte |

Es wird überprüft, ob das Fördermedium auch an der am höchsten gelegenen Stelle im Rohrleitungssystem im flüssigen Zustand gehalten werden kann oder ob es verdampft, wenn der Druckerzeuger (in der Regel die Pumpe) abgeschaltet wird.

Dazu wird zunächst der Druck an der Hochstelle berechnet:

$$p_H = p_T - \rho \cdot g \cdot (h_H - h_T)$$

Die Bewertung in der Kategorie III ergibt sich dann wie folgt:

$$G_{III} = \begin{cases} F_{III} \text{ für } p_H > p_D \\ -F_{III} \text{ für } p_H \leq p_D \end{cases}$$

Die Festlegung des Gewichtungsfaktors $F_{III}$ obliegt dem Anwender und erfolgt individuell in Relation zu den Gewichtungsfaktoren der anderen drei Kategorien. Dadurch wird eine Gewichtung des Risikos nach Kategorie III gegenüber den Risiken nach Kategorie I, II oder IV vorgenommen.

<u>Bewertung in Kategorie IV (Bewertungsgröße $G_{IV}$):</u>

Hier wird das Risiko, dass es aufgrund eines schnellen Schließens einer Armatur am Leitungsanfang oder aufgrund eines Ausfalls einer Pumpe zu instationär gebildeten Dampfblasen und dadurch bedingten Kondensationsschlägen kommen könnte, bewertet.

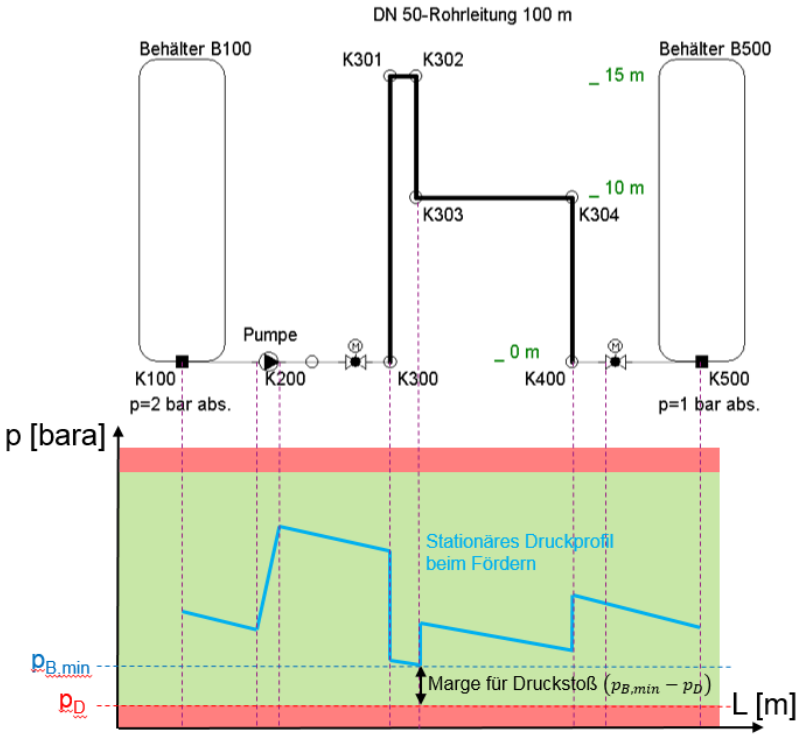



**Abbildung 19: Gefährdung durch (instationäre) Kondensationsschläge**

Zur Bewertung werden die folgenden Parameter benötigt:

| | |
|---|---|
| $\Delta p$ | abgeschätzte maximale Druckänderung durch den Druckstoß (z. B. nach Joukowski-Formel oder modifizierter Joukowski-Formel) |
| $p_D$ | Dampfdruck des Fördermediums |

$p_{Bmin}$ minimale (stationärer) Betriebsdrücke

Zunächst wird das Verhältnis gebildet aus dem abgeschätzten Druckstoß $\Delta p$ und der Differenz zwischen dem minimalen Betriebsdruck Druck $p_{Bmin}$ und dem Dampfdruck des Fördermediums $p_D$. Liegt dieses Verhältnis über dem Wert 1, kann der Druck durch den Druckabfall hinter der Armatur oder der Pumpe auf Dampfdruck abfallen und es kann sich eine instationäre Kavitationsblase ausbilden. Damit besteht ein Risiko für Kondensationsschläge. In der untenstehenden Formel für $G_{IV}$ ergeben sich dann negative Werte für den Term in eckiger Klammer. Verhältniswerte unter 1 stehen für Druckstöße, die den Druck nicht auf Dampfdruck absinken lassen. Hierfür ergeben sich positive Werte für den Term in eckiger Klammer. Dieser Term wird mit einem Gewichtungsfaktor $F_{IV}$ multipliziert und ergibt so die Bewertungsgröße $G_{IV}$ in Kategorie IV.

$$G_{IV} = F_{IV} * \left[1 - \frac{\Delta p}{(p_{Bmin} - p_D)}\right]$$

Die Festlegung des Gewichtungsfaktors $F_{IV}$ obliegt dem Anwender und erfolgt individuell in Relation zu den Gewichtungsfaktoren der anderen drei Kategorien. Dadurch wird eine Gewichtung des Risikos nach Kategorie IV gegenüber den Risiken nach Kategorie I, II oder III vorgenommen.

**Beispiel:**

Durch eine 1000m lange DN80/PN40-Leitung soll ein Fördermedium (Dichte 1100 kg/m³, Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit 1500 m/s, Dampfdruck bei Fördertemperatur 0,01 bara) mit einem Volumenstrom von 20 m³/h in einen Tank im Tanklager gefördert werden. Der Hochpunkt der Leitung liegt 11m höher als der tiefste Punkt, an dem im drucklosen Zustand Flüssigkeit ausfließen könnte. Die am Tank verbaute Armatur sei ein Kugelhahn mit einer Schließzeit von 20 Sekunden. Die Pumpe soll einen Nullförderdruck von 4,4 bara aufweisen. Es ist zu klären, ob für diese Leitung eine detaillierte Druckstoßbetrachtung anhand eines Simulationsmodells erstellt werden muss oder ob eine analytische Abschätzung genügt.

*Bewertung in Kategorie I:*

Anhand der Daten lässt sich ein Joukowskistoß von 16,4 bar berechnen. Die Schließzeit der Armatur am Leitungsende (20 Sekunden) ist 15-mal so lang wie die Reflexionszeit (1,33s). Damit ist der Druckstoß geringer als der, den man nach der Joukowski-Formel berechnet. Wendet man in diesem Fall die modifizierte Joukowski-Formel an (Schließzeitkorrekturfaktor x=0,1 für Kugelhahn), dann erhält man eine Druckerhöhung von ca. 11,0 bar. Addiert man diese zum Nullförderdruck der Pumpe (4,4 bara), dann erhält man einen Maximaldruck von 15,4 bara und liegt damit weit unter dem Nenndruck PN40, der in diesem Fall als obere Druckgrenze angenommen wird. Es sind als keine Überschreitungen des zulässigen Drucks durch Druckstöße zu erwarten. Die „Waage“ tendiert in Kategorie 1 in Richtung „grün“.

*Bewertung in Kategorie II:*

Der maximale Druckgradient durch den Druckstoß ist gering. Denn die berechnete Druckerhöhung von 11,0 bar findet innerhalb von 2 Sekunden ($x^* T_S$) statt, d. h. der Druckgradient beträgt 5,5 bar/s. Für einen Pumpenausfall nimmt man als Orientierungswert einen Druckgradienten von -50 bar/s an (siehe 9.1), also einen deutlich höheren absoluten Druckgradienten. Unter Berücksichtigung der Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit von 1500 m/s erhält man bei einem Druckgradienten von 50 bar/s in einem 100m langen geraden Rohrabschnitt eine maximale Druckdifferenz von 3,33 bar, die in einer DN80-Leitung zu einer maximalen Axialkraft von 3,7 kN führen. Diese Axialkraft sollten von Standard-Rohrhalterungen problemlos aufgenommen werden können. Die Bewertung in Kategorie II lässt die „Waage“ folglich in Richtung „grün“ ausschlagen.

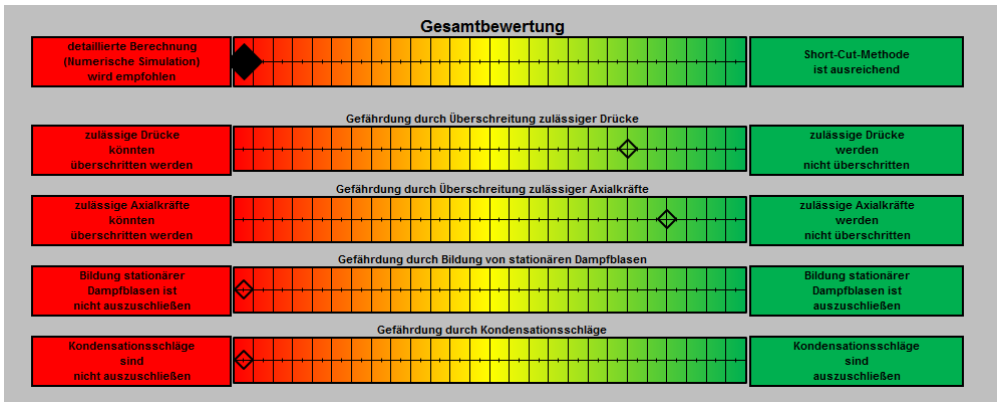
*Bewertung in Kategorie III:*

Im drucklosen Zustand, also bei abgestellter Pumpe, könnte das Fördermedium gravitationsbedingt über einen tiefgelegenen Punkt z. B. zurück in den Tank fließen und es entstünde unter Umständen am höchsten Punkt im Rohrleitungsverlauf eine Kavitationsblase (Medium unter Dampfdruck). Das ist in dem vorliegenden Beispiel der Fall, denn das Fördermedium hat eine Dichte von 1100 kg/m³ und einen Dampfdruck von 0,01 bara. Geht man davon aus, dass am Tiefpunkt Atmosphärendruck herrscht (leerer Tank), dann kann am Hochpunkt, der in Beispiel 11 m höher liegt, der Dampfdruck erreicht werden. Es besteht somit die Gefahr, dass eine Dampfblase entstehen kann, die beim Wiederanfahren der Pumpe einen Kondensationsschlag hervorrufen könnte. Die „Waage“ der Kategorie III schlägt also stark in Richtung „rot“ aus.

*Bewertung in Kategorie IV:*

Schließt man einen Kugelhahn (Schließzeit wieder mit 20 s angenommen) am Anfang der 1000 m langen Leitung, dann erniedrigt sich der Druck stromabwärts der Armatur in einer Größenordnung, wie man sie mit der modifizierten Joukowskiformel berechnet. In dem Beispiel würde der Druck, ausgehend vom stationären Druck, der am Leitungsanfang noch näherungsweise dem Pumpendruck von 4,4 bara entspricht, um theoretische 11,0 bar verringern, also potentiell den Dampfdruck erreichen und somit einen Kondensationsschlag hervorrufen. Somit geht die Bewertung durch die „Waage“ der Kategorie IV klar in Richtung „rot“.

Fasst man die „Waage“-Ergebnisse in den vier Kategorien zusammen, so ergibt sich folgendes Bild:



Obwohl die Abschätzung nach Joukowski nur relativ harmlose Ergebnisse liefert (Kategorie I) und obwohl auch die abgeschätzten dynamischen Kräfte moderat sind (Kategorie II), wird nach der „Waage"-Methode eine genauere Analyse dieses Systems empfohlen, weil sie Hinweise liefert, dass es hier zu Bildung von stationären Dampfblasen (Kategorie III) und zu instationären Kondensationsschlägen (Kategorie IV) kommen könnte. Es ist in diesem Fall also geboten, per Simulationsmodell genauer hinzuschauen.

In dem Beispiel wurde auf die Gewichtungsfaktoren $F_I$ bis $F_{IV}$ bewusst nicht eingegangen. Die Gewichtung der einzelnen Gefährdungen obliegt dem Anwender. Hier sollen allerdings folgende Hinweise gegeben werden:

1. Würde es in dem Beispiel keine Armatur am Leitungsanfang geben, könnte man die Bewertung nach Kategorie IV einfach weglassen (bzw. den Gewichtungsfaktor $F_{IV}$ auf null setzen) und die Gesamtbewertung nur anhand der drei ersten Kategorien vornehmen.
2. Da Kondensationsschläge in der Regel kritischer zu bewerten sind als klassische Druckstöße wird empfohlen, den Kategorien III und IV stärker zu gewichten als die Kategorien I und II.

## 12.3 Parameter, die den Druckstoß beeinflussen können

**Tabelle 1: Parameter, die den Druckstoß beeinflussen können.**

| **Parameter** | **Einfluss auf Druckstoß** | **Auswirkungen / Verweis** |
|---|---|---|
| Druckwellenausbreitungs-geschwindigkeit | +++ | Beeinflusst maßgeblich den Druckstoß. |
| Leitungslänge | +++ | Mit zunehmender Länge der Anschlussleitung vergrößert sich die Amplitude eines Druckstoßes. |
| Höhenverlauf der Rohrleitung | +++ | Große Höhenunterschiede im Leitungsverlauf begünstigen die Gefahr für Kondensationsschläge |
| Volumenstrom | +++ | Beeinflusst die Fluidströmungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers. |
| Armaturen-Schließzeit | +++ | Numerische Berechnung der Schließzeit (verfügbare Software: SIR 3S, FloMASTER, Pipenet u.a.) |
| Armaturenkennlinien | +++ | VDI/VDE 2173 |
| Pumpe | +++ | Pumpentyp, Fahrweise, Leistung, Kennlinien, Regelungsart |
| Fluid | +++ | Kompressibilität (Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit) |
| Fluid-Temperatur | ++ | Beeinflusst die Kompressibilität und Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit des Fluides. |
| T-Stücke | ++ | An T-Stücken wird Energie reflektiert und übertragen (Transmission), wodurch Druckspitzen in der angeschlossenen Rohrleitung niedriger sind. |

| Parameter | Einfluss auf Druckstoß | Auswirkungen / Verweis |
|---|---|---|
| Rohrdurchmesser | ++ | Beeinflusst die Fluidströmungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Volumenstroms. |
| Physikalische Fluideigenschaften | ++ | Dichte, Dampfdruck, usw. |
| Bögen | (+) / +++ | Die Bögen der Rohrleitung haben geringe Einflüsse (abhängig vom Winkel) auf die 1-D numerische Druckstoßberechnung. Sie sind jedoch für die infolge Druckstöße resultierenden Kräfte von Bedeutung. |
| Leitungswerkstoff | +(++) | Beeinflusst die Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit.<br>Der Einfluss ist bei nur stahlähnlichen Werkstoffen gering, bei Anwendung unterschiedlicher Typen (z.B. Stahl UND Kunststoff) dagegen hoch. |

## 12.4 Druckstoßszenarien und Vermeidungsstrategien

### 12.4.1 Pumpenanfahren (Kreiselpumpen)

Beim Anfahrprozess der Pumpen wird häufig gegen eine geschlossene Armatur (z. B. Schieber) angefahren. Sobald der Druck auf der Druckseite der Pumpe aufgebaut ist, wird die druckseitige Armatur geöffnet. Durch diesen (schnellen) Öffnungsvorgang wird der Druck in der Leitung schnell ansteigen. Die dadurch resultierenden Kräfte (Impulslasten) können die Rohrleitung bzw. die Anlagenteile (wie Wärmetauscher, Filter) schädigen. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn vor dem Öffnen der druckseitigen Armatur stationäre Dampfblasen im Rohrleitungssystem vorhanden sind.

**Vermeidung:**

- Langsames Öffnen der druckseitigen Armatur bis das System vollständig gefüllt ist
- Durchflussbegrenzung bis zu vollständiger Systemfüllung
- Sanftanlauf über Frequenzumrichter

### 12.4.2 Pumpenausfall

Ein Pumpenausfall im laufenden Förderbetrieb hat eine schnelle Druckabsenkung in der Rohrleitung zur Folge. (Das wird im Waagen-Modell mit einem Erfahrungswert für die Druckabsenkung berücksichtigt). Dadurch können

- an Hochpunkten Dampfblasen entstehen
- schließende Rückschlagklappen Druckstöße verursachen.

Zur Berechnung des Szenarios „Pumpenausfall“ müssen

- die Trägheitsmomente der Pumpen berücksichtigt werden oder
- Ausfallzeiten bekannt sein.

**Vermeidung:**

- Vakuumbrecher
- Schwungmassen
- Hydrospeicher

### 12.4.3 Rückschlagklappen

Auch Rückschlagarmaturen können Druckstöße erzeugen, wenn sie nicht schnell genug schließen (können) und dadurch – vor dem Schließen – Rückströmung entsteht (z. B. bei Pumpenumschaltung oder -ausfall).

Rückschlagarmaturen mit Endlagendämpfung müssen vor jeder Inbetriebnahme auf Funktion überprüft werden.

**Vermeidung:**

- Düsenrückschlagarmaturen arbeiten nahezu druckstoßfrei (bis Nennweiten < ca. DN 800)
- Falls der Betrieb es zulässt, wird empfohlen, Rückschlagarmaturen durch Regelarmaturen zu ersetzen
- Falls möglich, Rückfluss zulassen

### 12.4.4 Betrieb mehrerer Pumpen

Beim Betrieb mehrerer Pumpen können Fluidlasten entstehen durch

- Pumpenumschalten
- Pumpenanfahren
- Pumpenausfall

**Vermeidung:**

- Siehe 12.4.1
- langsames Drosseln des Durchflusses vor dem Umschalten
- Sanftanlauf über Frequenzumrichter

### 12.4.5 Pumpenumschalten

Pumpenumschaltvorgänge führen zu potenziellen Druckstößen infolge des möglichen Klappenschlags der Rückschlagarmatur an der heruntergefahrenen Pumpe.

**Vermeidung:**

- Siehe 12.4.1

### 12.4.6 Schließen einer Armatur

Durch Armaturenschließvorgänge wird die kinetische Energie der Fluide in potenzielle Energie (Druck) umgewandelt. Je größer die Fließgeschwindigkeit, je schlechter die Drosselwirkung und je schneller der Schließvorgang ist, desto größer ist die Amplitude der Druckwelle (Druckstoß).

Stromabwärts einer schließenden Armatur kann es zu einem Kondensationsschlag kommen, wenn der Druck bis auf Dampfdruck abfällt.

**Vermeidung:**

Um Druckstöße zu vermeiden, können

- die effektiven Schließzeiten der Armaturen vergrößert / optimiert werden oder
- die Armaturen gegen einen anderen Armaturentyp (Ventil) ausgetauscht werden
- schnelle Antriebe (pneumatische / Handhebel) gegen langsamere Antriebe (mit Getriebe / mit intelligenten Stellungsreglern) ausgetauscht werden.

### 12.4.7 Überfüllsicherungen / Nottrennsysteme

Diese Schutzeinrichtungen können infolge des schnellen Schließens Druckstöße zur Folge haben, die das System zu stark belasten.

**Vermeidung:**

- Siehe 12.4.6

### 12.4.8 Mehrere Armaturen werden gleichzeitig geschlossen

Möglicherweise werden zwei oder mehrere Armaturen aus unterschiedlichen, hydraulisch verbundenen Rohrleitungen gleichzeitig geschlossen. Hierbei wird ein relativ hoher Druckstoß verursacht im Vergleich zum Schließen nur *einer* Armatur.

**Vermeidung:**

- Siehe 12.4.6
- Falls möglich, zeitlich versetzt schließen

### 12.4.9 Armaturen im Ereignisfall schließen (Feuerwehr schließt Kugelhahn)

Armaturen, die im Ereignisfall schnell geschlossen werden müssen, dürfen keinen zusätzlichen Schaden verursachen. Die zulässigen Schließzeiten solcher Armaturen (die meisten sind Handarmaturen) müssen bei der Druckstoßbetrachtung durch ein worst-case Szenario (maximal möglicher Mengenstrom) mit berücksichtigt werden.

Hinweis: Im Ereignisfall (z. B. Störfallablaufszenario) können die vorherrschenden Bedingungen stark von den Auslegungsbedingungen abweichen.

**Vermeidung:**

- Siehe 12.4.6
-

### 12.4.10 Füllen von Systemen

Das schnelle Befüllen („Priming“) von Systemen kann zu hohen dynamischen Lasten führen (s. Szenario 12.4.1 „Pumpenanfahren“).

**Vermeidung:**

- Siehe 12.4.1

### 12.4.11 Öffnen von Armaturen / Be- und Entlüftungsarmaturen

Das schnelle Öffnen von Armaturen kann ebenfalls zu hohen dynamischen Lasten führen (s. Szenario 12.4.1„Pumpenanfahren“).

Be- und Entlüftungsarmaturen können Druckstöße verursachen, wenn die Entlüftung nicht gedrosselt abläuft.

**Vermeidung:**

- Langsames, kontrolliertes Öffnen
- Einsatz von sanft-schließenden Be- und Entlüftungsarmaturen

### 12.4.12 Sicherheitsarmaturen

Sicherheitsarmaturen haben kurze Öffnungs- und Schließzeiten und führen dadurch zu potenziellen Lasten.

Weiterhin kann das Leitungssystem infolge von dynamischen Stellvorgängen (sog. „Pumpen“ / „Flattern“) zu (Fluid-) Schwingungen angeregt werden.

**Vermeidung:**

- Dämpfung des Öffnungs- und Schließverhaltens
- Dynamische Berechnung

### 12.4.13 Abriss von Leitungen (Rohrbruch)

Ein Rohrbruch ist ein kritisches Szenario infolge der kurzen Zeitskala (wenige Millisekunden). Neben der Gefahr der Impulslast besteht die Gefahr eines anschließenden Druckstoßes durch Reflektion von Druckwellen an Behältern und geschlossenen („toten“) Enden.

**Vermeidung:**

Individuelle Maßnahmen müssen aus **detaillierten numerischen Berechnungen abgeleitet werden.**

## 12.5 Kurzbericht

Es folgt ein Beispiel für einen möglichen Aufbau eines Kurzberichtes:

**Prüfung der Einwirkungen von Druckstößen im Netz**

Ihr Auftrag vom

Guten Tag,

sehr geehrter ,

das nachfolgend genannte Rohrleitungsverbundnetz wurde im Hinblick auf Druckstöße in einer Rohrleitung geprüft.

| | |
|---|---|
| Rohrleitungsverbundnetz | |
| Betreiber: | |
| Standort / Bau: | / |
| Berechnungsprogramm | |
| Netzfließbild-Nr. | |

## Rohrleitungen im Verbundnetz

Es wurden alle Rohrleitungen berücksichtigt:

Ja Nein

Bemerkungen:

## Relevante Stoffeigenschaften

Die Stoffeigenschaften sind vorhanden

Ja Nein

Bemerkungen:

## Armaturen / Eigenschaften:

Es wurden alle relevanten Armaturen mit Ihren Eigenschaften berücksichtigt:

Ja Nein

Bemerkungen:

### Typ / Eigenschaften der Pumpen:

Es wurden alle Druckerzeuger berücksichtigt:

Ja Nein

Bemerkungen:

**Armaturen im Netz:**

Es wurden alle Armaturen mit deren Charakteristiken und Schließzeiten dargestellt:

Ja Nein

Bemerkungen:

**Kräfte im Netz:**

Es wurden alle durch Druckstoß entstehenden Kräfte im Hinblick auf das Halterungskonzept berücksichtigt

Ja Nein

Bemerkungen:

**Szenarien**

Es wurden alle relevanten Druckstoßszenarien berücksichtigt:

Ja Nein

Bemerkungen:

**Randbedingungen:**

- Die Zulassungsdaten entsprechen gemäß Aussage des Betreibers den Angaben in den jeweiligen Rohrklassen.
- Sonstige Einflüsse wurden, soweit sie nicht in der Dokumentation vermerkt sind, nicht berücksichtigt.
- Weichen die Randbedingungen von denen der geprüften Unterlagen ab, so ist eine Wertung bzw. Neuberechnung erforderlich.
- Die Randbedingungen sind im Rahmen einer Prüfung vor Inbetriebnahme zu prüfen.

**Anlagen:**

1. Netzfließbild
2. …
3. …

Ort, Datum

_____

## 12.6 Langbericht

Es folgt ein Beispiel für einen möglichen Aufbau eines Langberichtes:

**Prüfung der Einwirkungen von Druckstößen im Netz**

Ihr Auftrag vom

Guten Tag,

sehr geehrter ,

das nachfolgend genannte Rohrleitungsverbundnetz wurde im Hinblick auf Druckstöße in einer Rohrleitung geprüft.

| | |
|---|---|
| Rohrleitungsverbundnetz | |
| Betreiber: | |
| Standort / Bau: | / |
| Berechnungsprogramm | |
| Netzfließbild-Nr. | |

## Rohrleitungen im Verbundnetz

**Rohrleitungsnummer: LN….**

| | PS (bar) | TS (°C) | Nennweite | Rohrklasse |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| | | | | |

**Relevante Stoffeigenschaften**

| Temperatur | Dichte | Kin. Viskosität | Dampfdruck | Schallgeschw. |
|---|---|---|---|---|
| °C | [kg/m³] | [m²/s] | [bar abs] | [m/s] |
| -10 | | | | |
| 20 | | | | |
| 50 | | | | |

**Armaturen/Eigenschaften:**

| Schieber (Schi) | | Kükenhahn (Kü) | | Kugelhahn (Ku) | |
|---|---|---|---|---|---|
| Winkel | Verlustbeiw. | Winkel | Verlustbeiw. | Winkel | Verlustbeiw. |
| phi [%] | Zeta | phi [%] | Zeta | phi [%] | Zeta |
| | | | | | |
| | | | | | |

**Typ / Eigenschaften der Pumpen:**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| | | | | |

**Armaturen im Netz:**

| Einbauort (Bau) | Armatur – Nr. | Typ | $K_{vS}$ Wert | Charakteristik | Schließzeit (s) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |

**Szenarien:**

Folgende Szenarien wurden berücksichtigt:

| Nummer | Art des Szenarios | Ergebnis der Druckbetrachtung | Ergebnis der Kräftebetrachtung |
|---|---|---|---|
| Szenario 1 | Pumpenausfall | Max. Druckspitze in LN: XX bar | Max. Krafteintrag in LN: XX |

**Ergebnis der rechnerischen Prüfung:**
Die aufgeführten Rohrleitungen in Verbindung mit den Rohrhalterungen in dem oben genannten Rohrleitungsverbundnetz sind im Hinblick auf die Einwirkungen der Kräfte durch Druckstöße ausreichend bemessen.

**Randbedingungen:**
- Die oben genannten Rohrklassen wurden dem Netzfließbild entnommen.
- Die Zulassungsdaten entsprechen gemäß Aussage des Betreibers den Angaben in den jeweiligen Rohrklassen.
-
-
-
- Sonstige Einflüsse wurden, soweit sie nicht in der Dokumentation vermerkt sind, nicht berücksichtigt.
- Weichen die Randbedingungen von denen der geprüften Unterlagen ab, so ist eine Wertung bzw. Neuberechnung erforderlich.
- Die Randbedingungen sind im Rahmen einer Prüfung vor Inbetriebnahme zu prüfen.

**Anlagen:**

1. Netzfließbild
2. …
3. …

Ort, Datum _____

## 12.7 Bedienungsanleitung zum Prozess „Hydraulische Berechnung von Systemen“

Der Prozess „Hydraulische Berechnung von Systemen“ wurde als eine Ereignis-Prozesskette modelliert, die auf grafischen Symbolen basiert (s. Abb. 19: Übersicht & 20-24: Details).

Verwendete Symbole:

Zunächst unterscheidet man dabei zwischen sogenannten „Ereignissen“ und „Funktionen“.

Ein Ereignis (im Prozess als gelbes Feld dargestellt) beschreibt einen eingetretenen relevanten Zustand, der den weiteren Ablauf eines Prozesses beeinflusst. In jeder Ereignis-Prozesskette bildet ein solches Ereignis den Start-Punkt und ein anderes den End-Zustand.

Eine „Funktion“ (grünes Feld) ist eine Tätigkeit oder eine Aktivität, um ein Ereignis zu erreichen.

Verbunden werden Ereignisse und Funktionen mittels „Kanten“ (schwarze Pfeile). Diese können verzweigt oder zusammengeführt werden (dafür dienen „Konnektoren“). Als Konnektoren werden drei verschiedene Typen genutzt: Oder-Verknüpfung (d. h. man kann einer oder mehreren der Abzweigungen folgen), Und-Verknüpfung (allen Abzweigungen zugleich folgen oder Entweder-Oder-Verknüpfungen), bei denen man einer oder mehreren Abzweigungen folgen kann.

**Ereignis** – Startereignis, Zwischenergebnisse, Endergebnis

**Funktion** – Tätigkeit, Aktivität

**Regel/Konnektor** -– logische Operatoren UND, ODER, Exklusives ODER

**Vorhandenes Dokument**

**Randbedingungen zum Verständnis:**

Bei der Erstellung oder dem Lesen einer Ereignis-Prozesskette sind bei allen Elementen – also Ereignissen, Funktionen, Kanten und Konnektoren – folgende Randbedingungen zu beachten:

- ➔ Nach einem Ereignis folgt entweder eine Funktion oder ein Konnektor (Ausnahme: Endereignis)
- ➔ Nach einer Funktion folgt entweder ein Ereignis oder ein Konnektor
- ➔ Jede Funktion hat genau eine eingehende und genau eine ausgehende Kante
- ➔ Jedes Ereignis hat genau eine eingehende und genau eine ausgehende Kante (Ausnahme: Start- und Endereignis)
- ➔ Ein Konnektor hat entweder
    - mehrere eingehende und genau eine ausgehende Kante oder
    - genau eine eingehende und mehrere ausgehende Kanten

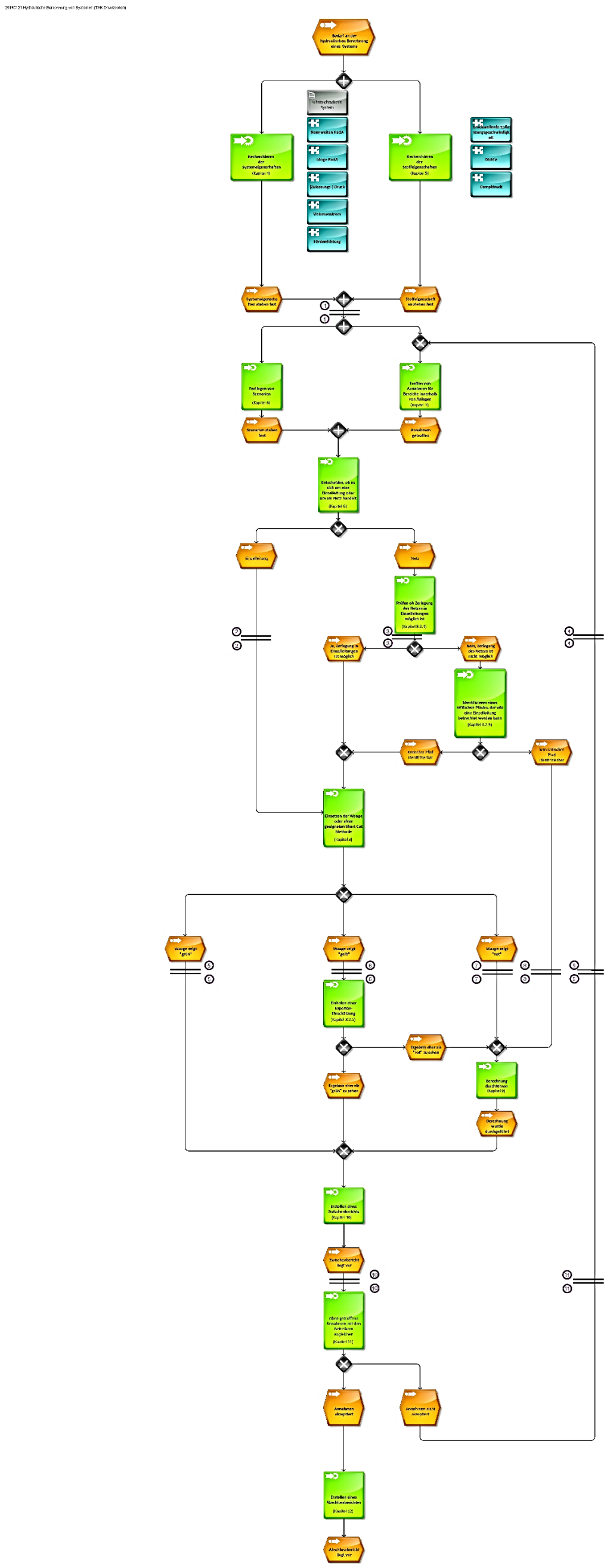



**Abbildung 20: Prozessdarstellung**

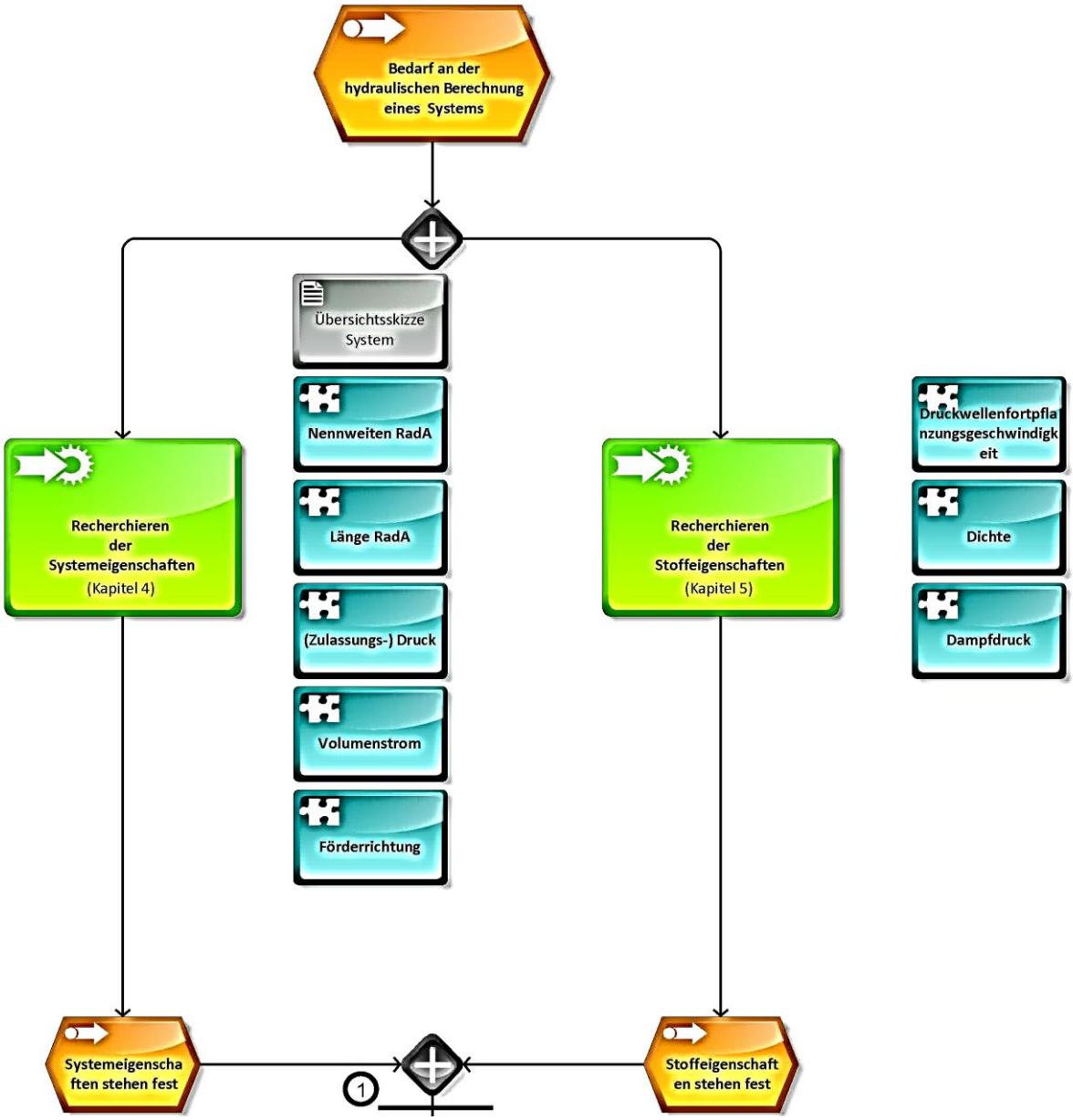



**Abbildung 21: Prozessdarstellung 1/5**

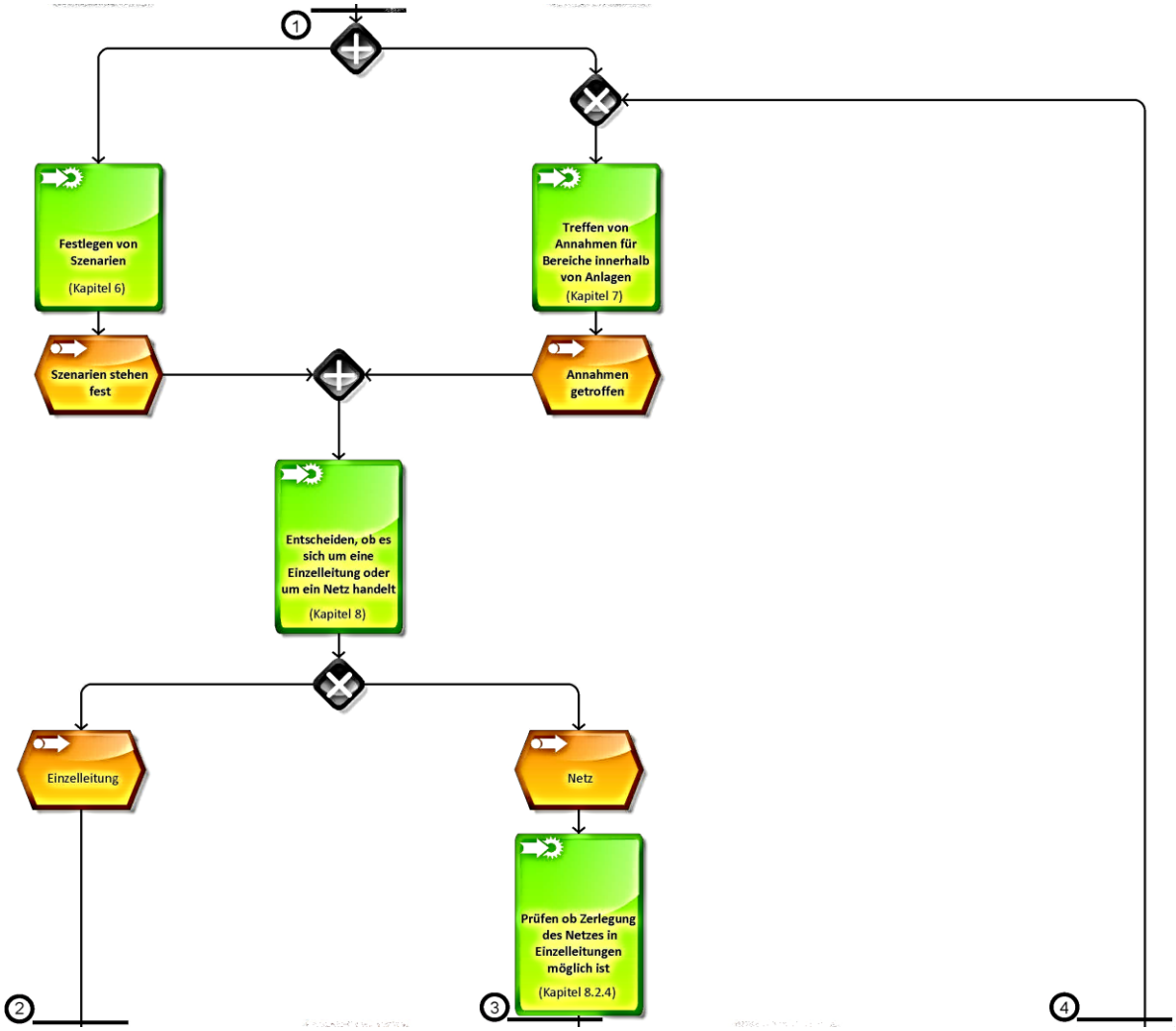



**Abbildung 22: Prozessdarstellung 2/5**

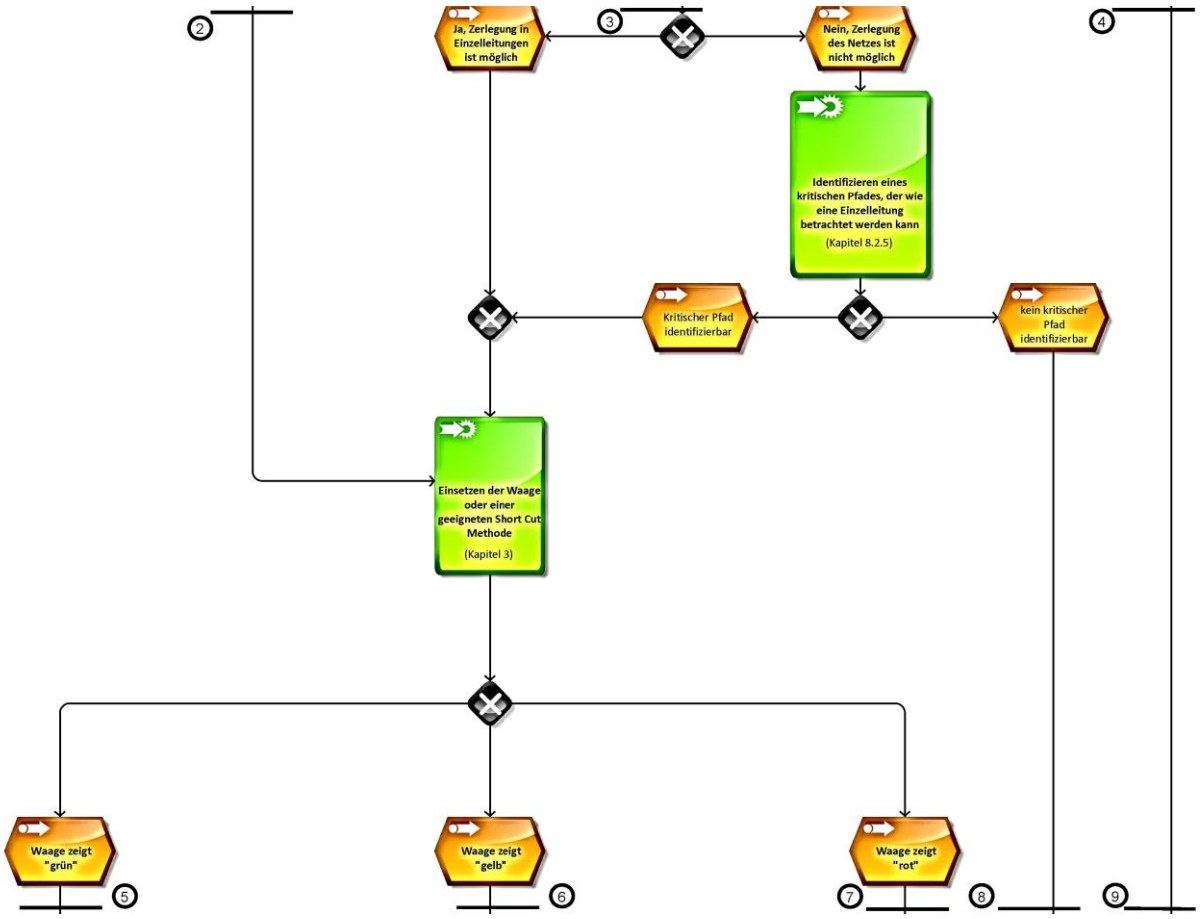



**Abbildung 23: Prozessdarstellung 3/5**

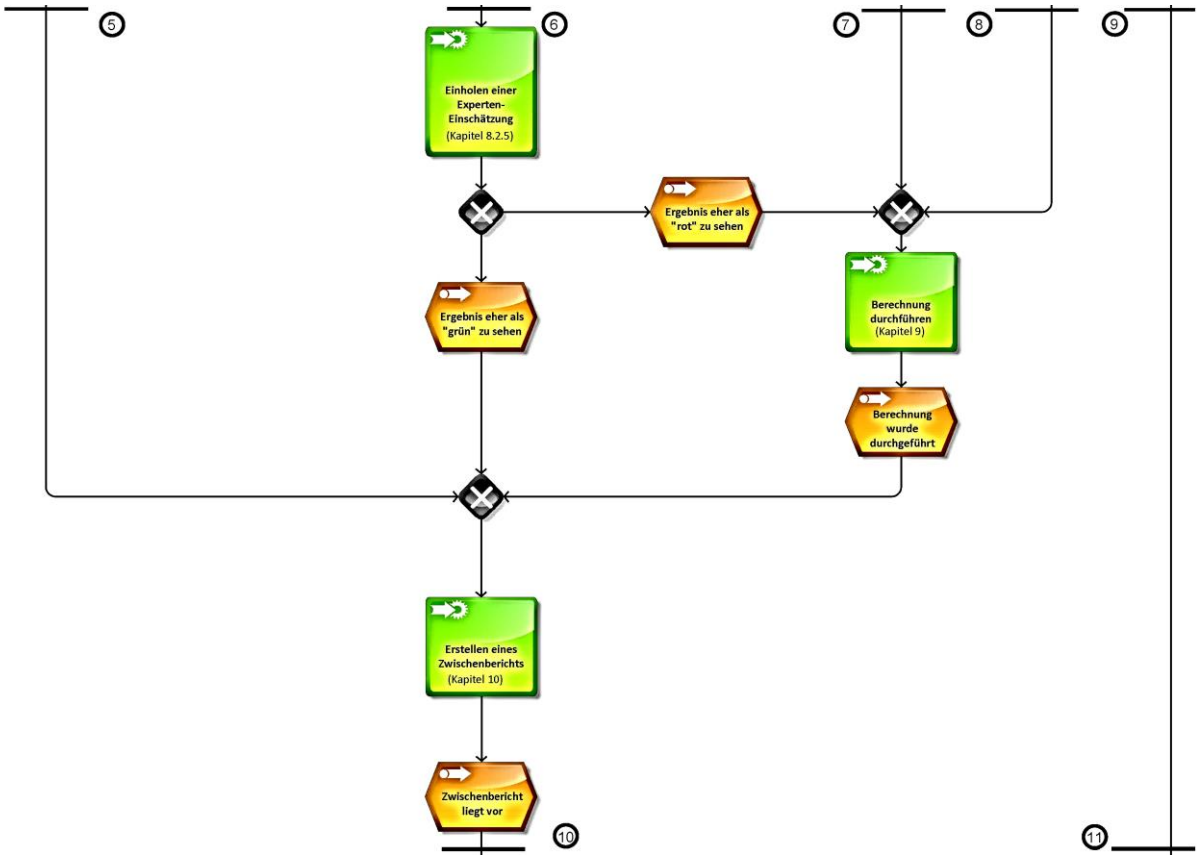



**Abbildung 24: Prozessdarstellung 4/5**

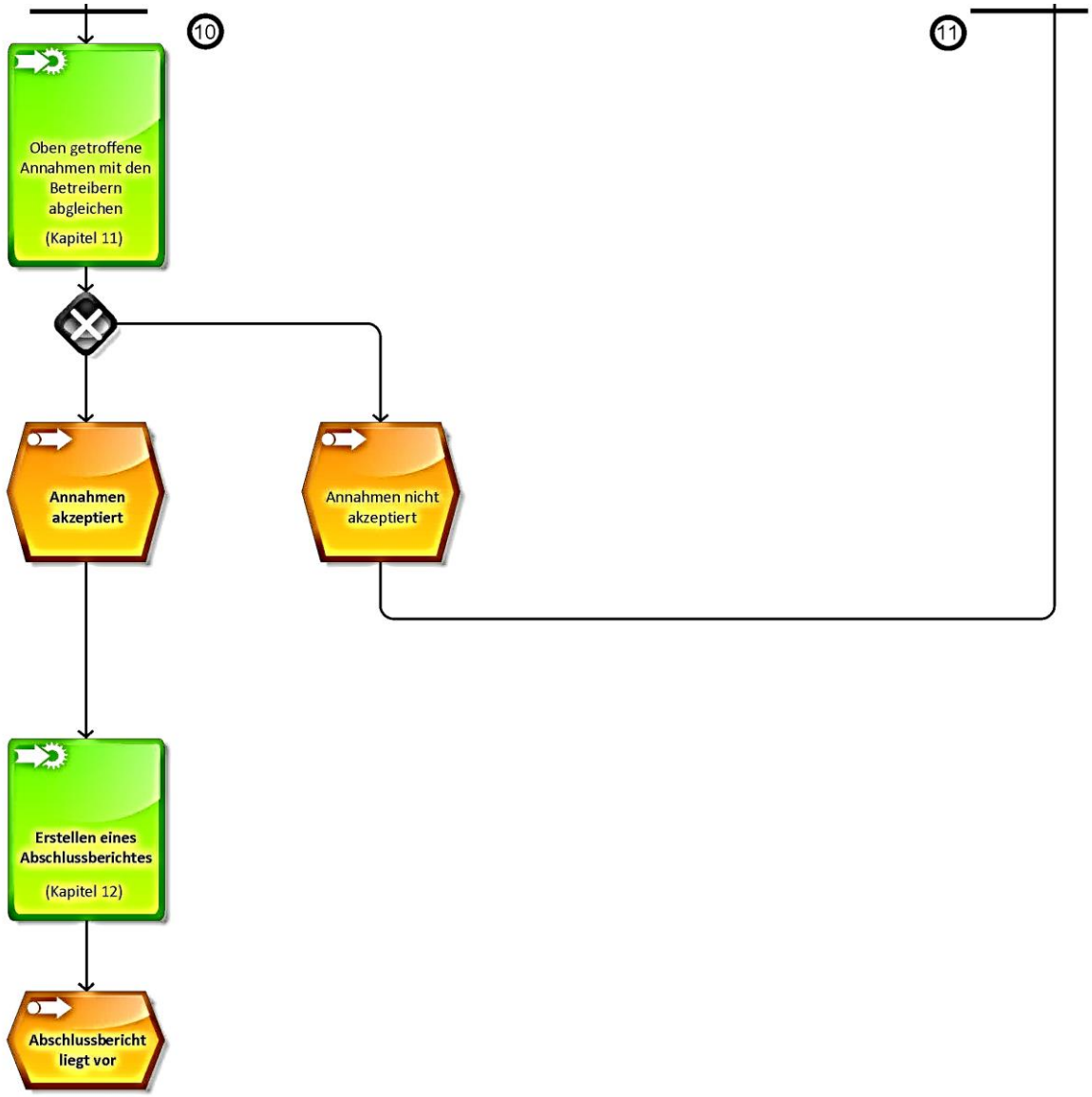



**Abbildung 25: Prozessdarstellung 5/5**

**RadA**:

Akronym für „Rohrleitungen außerhalb der Anlagen“. Alternativ „Transportsystem“.
Damit werden Leitungen oder Leitungsabschnitte bezeichnet, die einzelne Produktionseinheiten über die jeweiligen Anlagengrenzen verbinden. Sie basieren auf vereinbarten Übergabestellen, die oft durch die Baufeldgrenzen der Anlagen definiert sind. Diese verbindenden Leitungen können in der Verantwortung eines anderen Betreibers als dem der Produktionseinheit liegen.

**RidA:**

Akronym für „Rohrleitungen innerhalb der Anlagen“. Alternativ „Leitung im Startsystem“, „Leitung im Zielsystem“.
Leitungen oder Leitungsabschnitte, die in Abgrenzung zu „RadA“ (s.o.) im Verantwortungs- und Betreiberbereich der angeschlossenen Produktionseinheit liegen..

| | |
|---|---|
| $\rho$ | Dichte |
| $\lambda$ | Wellenlänge |
| $x$ | Wirksame Zeitanteil der Schließzeit |
| $v$ | Geschwindigkeit des Fluides |
| $u$ | Rohrkoordinate |
| $t$ | Zeit |
| $s$ | Wanddicke |
| $pBmin$ | minimale (stationärer) Betriebsdrücke |
| $p$ | Druck |
| $d$ | Durchmesser der Rohrleitung |
| $a$ | Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit |
| $L$ | Rohrleitungslänge |
| $I$ | Impuls |
| $F$ | Kraft |
| $DLF$ | Dynamischer Lastfaktor |
| $D$ | Durchmesser |
| $A$ | Querschnitt der Rohrleitung |
| $\mathrm{E}$ | Elastizitätsmodul |
| $\mathrm{d}u$ | Rohrleitungsabschnitt |
| $\Delta p$ | maximale Druckänderung durch den Druckstoß |
| $\alpha_0$ | Schallgeschwindigkeit |
| $p_T$ | Druck am tiefsten Punkt im Leitungssystem |
| $p_H$ | Druck an der Hochstelle |
| $p_D$ | Dampfdruck des Fördermediums |

| | |
|---|---|
| $E_M$ | Elastizitätsmodul der Rohrleitung |
| $h_T$ | geodätische Höhe des tiefsten Punktes im Leitungssystem, an dem das Fördermedium ausfließen könnte |
| $h_H$ | geodätische Höhe des Hochpunktes im Leitungssystem |

**Abbildung 26: Formelverzeichnis**

## 12.8 Verwendete Normen und Regelwerke

- BetrSichV - Betriebssicherheitsverordnung
  Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln vom 3. Februar 2015

- TRBS 1201 Prüfungen bei Gefährdungen durch Dampf und Druck,
  GMBl 2014, S. 950 [Nr.46] (26.08.2014)

- TRBS 2141 Gefährdungen durch Dampf und Druck,
  GMBl. 2019 S. 270 vom 03.2019

- DIN EN 805 Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden Deutsche Fassung EN 805: 2000

- VDI 6006, Druckstöße in Trinkwasserleitungen Ursachen, Geräusche und Vermeidung, November 2017

- VDI 3842, Schwingungen in Rohrleitungssystemen DVGW Arbeitsblatt W303, Juni 2004

- DIN EN 13480-3 Metallische industrielle Rohrleitungen – Teil 3: Konstruktion und Berechnung; Deutsche Fassung EN 13480-3:2017

- AD2000 Merkblätter

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung Modellwaage ..... 7
Abbildung 2: Beispiel zur Festlegung von Systemeigenschaften und Grenzen ..... 9
Abbildung 3: Annahmen für ein Start und Zielsystem ..... 14
Abbildung 4: Beispiel A Einzelleitung ..... 16
Abbildung 5: Beispiel B Einzelleitung ..... 17
Abbildung 6: Beispiel C Einzelleitung ..... 18
Abbildung 7: Beispiel D Verzweigtes Leitungssystem ..... 19
Abbildung 8: Beispiel E Verbundsystem ..... 20
Abbildung 9: Beispiel F Vermaschtes Netz ..... 21
Abbildung 10: Aus kritischem Pfad resultierende Maßnahmen sind auf alle anderen zu übertragen. 23
Abbildung 11: Kräfte aus Strömungslasten an Rohrkrümmern ..... 24
Abbildung 12: Übergabe der Differenzkraft an das Strukturanalyseprogramm, zu Variante 2 ..... 26
Abbildung 13: Übergabe der Einzelkräfte an das Strukturanalyseprogramm, zu Variante 1 ..... 26
Abbildung 14: Beispiele einer "2-Punkthalterung" und einer "4-Punkthalterung" ..... 34
Abbildung 15: effektive Schließzeit eines Kugelhahns ..... 37
Abbildung 16: Gefährdung durch Überschreitung des zulässigen Drucks ..... 39
Abbildung 17: Gefährdung durch Überschreitung zulässiger Axialkräfte ..... 40
Abbildung 18: Gefährdung durch Bildung von stationären Dampfblasen ..... 43
Abbildung 19: Gefährdung durch (instationäre) Kondensationsschläge ..... 44
Abbildung 20: Prozessdarstellung ..... 60
Abbildung 21: Prozessdarstellung 1/5 ..... 61
Abbildung 22: Prozessdarstellung 2/5 ..... 62
Abbildung 23: Prozessdarstellung 3/5 ..... 63
Abbildung 24: Prozessdarstellung 4/5 ..... 64
Abbildung 25: Prozessdarstellung 5/5 ..... 65
Abbildung 26: Formelverzeichnis ..... 68

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung ... 4
2 Anwendungsbereich ... 5
3 Vorgehensweise zur Druckstoßanalyse ... 6
3.1 Short-Cut-Methodik ... 6
3.2 Waage grün ... 8
3.3 Waage gelb ... 8
3.4 Waage rot ... 8
4 Systemeigenschaften ... 9
5 Stoffeigenschaften ... 11
6 Szenarien festlegen ... 13
7 Annahmen für das Start- und Zielsystem ... 14
8 Entscheidung Einzelleitung oder Netz ... 16
8.1 Einzelleitungen ... 16
8.2 Netze ... 19
8.2.1 Verzweigtes Leitungssystem ... 19
8.2.2 Verbundsystem (Netz) ... 20
8.2.3 Vermaschtes Netz ... 21
8.2.4 Prüfung der Zerlegung eines Netzes ... 22
8.2.5 Kritischer Pfad im Netz erkennbar ... 23
9 Druckstoßberechnung ... 24
9.1 Ermittlung der relevanten Druckänderungsgeschwindigkeit ... 26
9.2 Ermittlung der resultierenden Kräfte aus Druckstoß ... 27
10 Erstellung von Berichten ... 28
10.1 Zwischenbericht erstellen ... 28
10.2 Annahmen mit Betreiber abgleichen ... 29
10.2.1 Annahmen ... 29
10.2.2 Diskussion von Abhilfemaßnahmen ... 30
10.3 Abschlussbericht erstellen ... 32
11 Beurteilung von Ergebnissen ... 33
11.1 Beurteilung der Druckergebnisse ... 33
11.2 Beurteilung der Kräfteergebnisse ... 33
12 Anhang ... 35

12.1 Joukowski-Abschätzung ... 35
12.2 Erläuterung des „Waagen“-Modells und Beispiel ... 37
12.3 Parameter, die den Druckstoß beeinflussen können ... 47
12.4 Druckstoßszenarien und Vermeidungsstrategien ... 48
12.4.1 Pumpenanfahren (Kreiselpumpen) ... 48
12.4.2 Pumpenausfall ... 48
12.4.3 Rückschlagklappen ... 49
12.4.4 Betrieb mehrerer Pumpen ... 49
12.4.5 Pumpenumschalten ... 49
12.4.6 Schließen einer Armatur ... 50
12.4.7 Überfüllsicherungen / Nottrennsysteme ... 50
12.4.8 Mehrere Armaturen werden gleichzeitig geschlossen ... 50
12.4.9 Armaturen im Ereignisfall schließen (Feuerwehr schließt Kugelhahn) ... 50
12.4.10 Füllen von Systemen ... 51
12.4.11 Öffnen von Armaturen / Be- und Entlüftungsarmaturen ... 51
12.4.12 Sicherheitsarmaturen ... 51
12.4.13 Abriss von Leitungen (Rohrbruch) ... 51
12.5 Kurzbericht ... 52
12.6 Langbericht ... 55
12.7 Bedienungsanleitung zum Prozess „Hydraulische Berechnung von Systemen“ ... 58
12.8 Verwendete Normen und Regelwerke ... 69