

# Blowdown-Versuche in eine leere bzw. teilgefüllte Rohrleitung der Nennweite DN100

A. Dudlik; S. Schlüter; Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen

Durch Ansammlung von Flüssigkeit in Abblaseleitungen können im Falle des Blowdowns von Gasen oder Dämpfen Flüssigkeitspfropfen gebildet und im Leitungssystem beschleunigt werden. An Umlenkungen und Querschnittsverengungen werden Kräfte übertragen, deren Amplituden die Auslegungskriterien der Unterstützungen in der Regel erheblich übersteigen. Die Pfropfenbildung wird durch vertikale Leitungsabschnitte sowie durch die Zunahme des Antriebsdrucks begünstigt. Die Strömungsform wird qualitativ mit Leitfähigkeits-Gittersensoren erfasst. Der Beitrag enthält weiterhin ein einfaches physikalisches Modell zur Abschätzung von Systemdrücken und Lagerlasten für eine unverzweigte, horizontal verlegte Rohrleitung. Die Rechenergebnisse sind nicht immer konservativ im Vergleich zu den Messdaten. Dies ist auf den im Vergleich zur Einphasenströmung erhöhten Druckverlust in der Zweiphasenströmung zurückzuführen, der von dem Modell bisher nicht erfasst wird. Eine weiterführende experimentelle Untersuchung der Strömungsform ist erforderlich.

## Einführung

In Rohrleitungssystemen kommt es häufig zu unerwünschten Ansammlungen von Flüssigkeit an Tiefpunkten /1/, insbesondere in

- § Abblaseleitungen durch Kondensation der Luftfeuchte,
- § Dampf- und Gasleitungen durch Wärmeverlust an die Umgebung,
- § Rohrleitungen allgemein nach dem Reinigen mit Dampf oder Flüssigkeiten,
- § zeitweise stillgelegten Leitungsabschnitten durch Undichtigkeiten von Armaturen.

Wird z.B. durch Ansprechen einer Sicherheitsarmatur an einem Druckbehälter ein Blowdown eines Gases in eine Abblaseleitung eingeleitet, so ist zu erwarten

ten, dass der Druckverlust in der teilgefüllten Leitung weitaus höher als in der leeren ist. Neben dem möglicherweise zu kleinen Massenausstrag aus dem zu sichernden Behälter können an Rohrunterstützungen erhebliche Lagerlasten auftreten, die die Auslegungskriterien überschreiten. Aus diesen Gründen wurden experimentelle Untersuchungen an einer speziell zur Untersuchung von instationären Rohrströmungen errichteten Versuchsanlage durchgeführt.

## Beschreibung der Versuchsanlage

Die Versuchsanlage besteht im Wesentlichen aus zwei parallel verlegten Rohrleitungen der Nennweiten DN50 und DN100 (s. Abb.1). Die Leitungen sind in unterschiedlichen Längen von 0,5 m bis 12 m geflanscht, um spezielle Geometrien (z. B. Bypass der Rohrbrücke, Tiefpunkte) einfach nachzustellen und Glasrohre zur Visualisierung der Strömungsformen einsetzen zu können. Die Verschaltung der Anlagenteile Druckbehälter, Auffangbehälter, Durchlauferhitzer, Kompressor und Kreispumpen ermöglichen unterschiedliche Betriebsweisen, wie z.B.

- § Umlaufbetrieb bei Umgebungs- und erhöhter Temperatur /2/,
- § Umlaufbetrieb unter Vordruck,
- § Entlastungs- und Einstromvorgänge bis zu einem Vordruck von 40 bar.

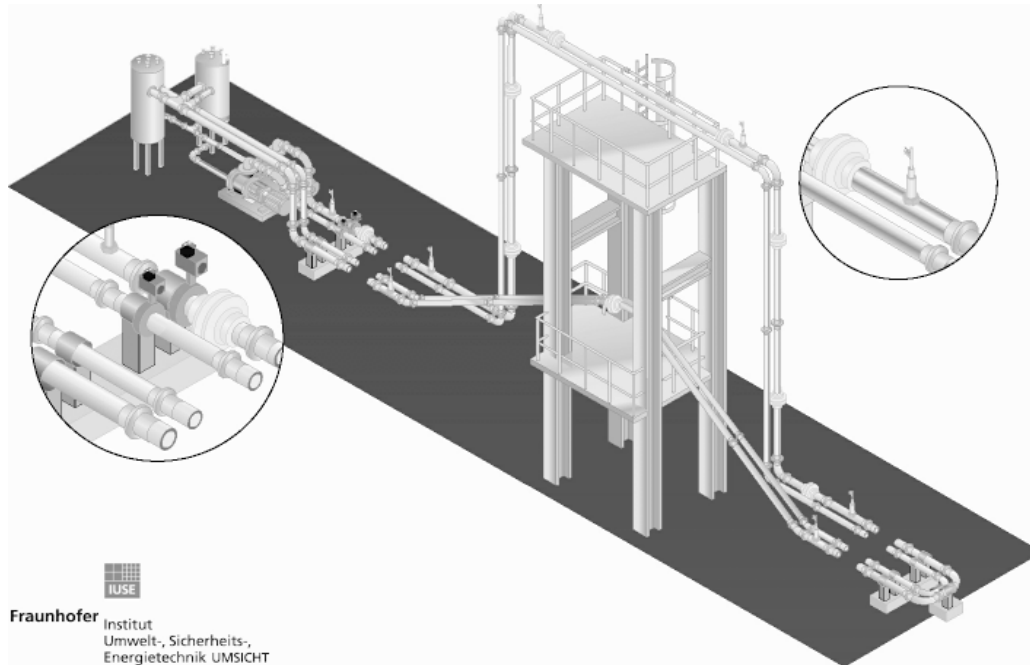


Abb. 1: Perspektivische Ansicht der rohrleitungstechnischen Versuchsanlage

| Versuchsleitungen                                | DN50             | DN100            |
|--------------------------------------------------|------------------|------------------|
| Gesamtlänge                                      | 225 m            | 225 m            |
| Länge ohne Rohrbrücke                            | 200 m            | 200 m            |
| Durchmesser [mm]                                 | 60,3 x 3         | 114,3 x 3        |
| Material                                         | Edelstahl 1.4571 | Edelstahl 1.4571 |
| $p_{\max}$ , 20 °C                               | 141 bar          | 79 bar           |
| $p_{\max}$ , 100 °C                              | 117 bar          | 65 bar           |
| Glasrohre                                        | 2 Stück          | 2 Stück          |
| Länge                                            | 2,0 m            | 2,0 m            |
| Maximaler Innendruck                             | ca. 40 bar       | ca. 30 bar       |
| Versuchsarmaturen                                |                  |                  |
| Exzentrische, metallisch dichtende Absperrklappe | 1 Stück          | 1 Stück          |
| Zentrische, weichdichtende Absperrklappe         | -                | 1 Stück          |

| Versuchsleitungen              | DN50                  | DN100                 |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Stellventil                    | -                     | 2 Stück               |
| Kugelhahn mit freiem Durchgang | 1 Stück               | 1 Stück               |
| kleinste Schließzeit           | ca. 50 ms             | ca 60 ms              |
| Rohrbrücke                     |                       |                       |
| Höhe                           | 10 m                  | 10 m                  |
| Länge                          | 6 m                   | 6 m                   |
| Pumpen                         | Stufenkreispumpe P1   | Kreispumpe P2         |
| Durchsatz                      | 50 m <sup>3</sup> /h; | 185 m <sup>3</sup> /h |
| Förderhöhe                     | 140 m                 | 55 m                  |
| Behälter                       | B1                    | B2                    |
| Inhalt                         | 2,0 m <sup>3</sup>    | 3,0 m <sup>3</sup>    |
| Maximaler Innendruck           | 40 bar                | atmosphärisch         |
| Durchlauferhitzer              | Leistung: 50 kW       | Temperatur: 95°C      |

Tabelle 1: Charakteristische Anlagendaten

Die charakteristischen Anlagendaten sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

## Beschreibung der transienten Messtechnik

An der Versuchsanlage wird die in Tabelle 2 spezifizierte Messtechnik zur Vermessung von transienten Strömungen eingesetzt.

| Messgröße                   | Anz. | Beschreibung                                      | Messfrequenz | Einsatz    |
|-----------------------------|------|---------------------------------------------------|--------------|------------|
| Druck                       | 10   | piezoresistive Druckaufnehmer incl. Meßverstärker | 20 kHz       | 0 - 76 bar |
| Kraft                       | 2    | Drei-Achsen-Kraftsensoren                         | 10 kHz       | ± 80 kN    |
| Dampfanteil & Strömungsform | 4    | Drahtgittertomographen                            | 1 kHz        | 0 - 100 %  |
|                             | 16   | Nadelsonden                                       | 10 kHz       | 0 - 100 %  |

|                            |   |                                                    |        |             |
|----------------------------|---|----------------------------------------------------|--------|-------------|
| Strömungsform              | 1 | Hochgeschwindigkeits-Videokamera (VHS)             | 8 kHz  | 40 bar      |
| Ventilstellung             | 4 | Hall-Sensor Stellungsrückmeldung                   | 1 kHz  | 0 - 90°     |
| Druckwellengeschwindigkeit | 9 | Meßstellen zur Laufzeitmessung mit Druckaufnehmern | 20 kHz | 0 - 10 km/s |

Tabelle 2: Transiente Meßtechnik in der Versuchsanlage

### Transiente Druckmessung

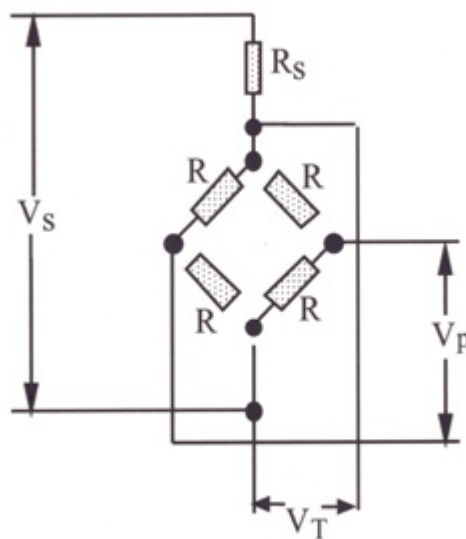


Abb. 2: Messbrücke (5-Leiter- Ausführung)

Das piezoresistive Messprinzip der eingesetzten Druckaufnehmer (Typ: XTM 190M-70) ist in Abb. 2 dargestellt. Durch Druckeinwirkung verändert sich der Widerstand in der Messbrücke und wird als  $U_P$  gemessen. Durch die zusätzliche Erfassung der Medientemperatur  $U_T$  wird ein Temperaturabgleich vorgenommen. Aufgrund langer Übertragungswege (50 - 150 m) wird das Spannungssignal mit schnellen Messverstärkern (Typ: D486-WG IP65) vor Ort auf ein Normsignal umgewandelt (4 - 20 mA, 2 - 10 V) und zur Messdatenerfassung verlustfrei weitergeleitet. Die charakteristischen Vor- und Nachteile dieses Meßsystems sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

| Vorteile                              | Nachteile                                      |
|---------------------------------------|------------------------------------------------|
| - hohe Reproduzierbarkeit             | - große Nullpunktsfehler (Dampfdruckniveau)    |
| - keine Langzeitdrift                 | - nach jedem Aus- und Umbau neu zu kalibrieren |
| - hohes zeitliches Auflösungsvermögen |                                                |

Tabelle 3: Eigenschaften der eingesetzten Miniaturdruckaufnehmer

Die Druckaufnehmer sind in den horizontal verlegten Abschnitten von unten in die Messleitungen eingebaut (s. Abb. 3). Dadurch wird vermieden, dass Luftbläschen in der Nähe des Aufnehmers haften und die Druckspitzen während der Messung dämpfen.

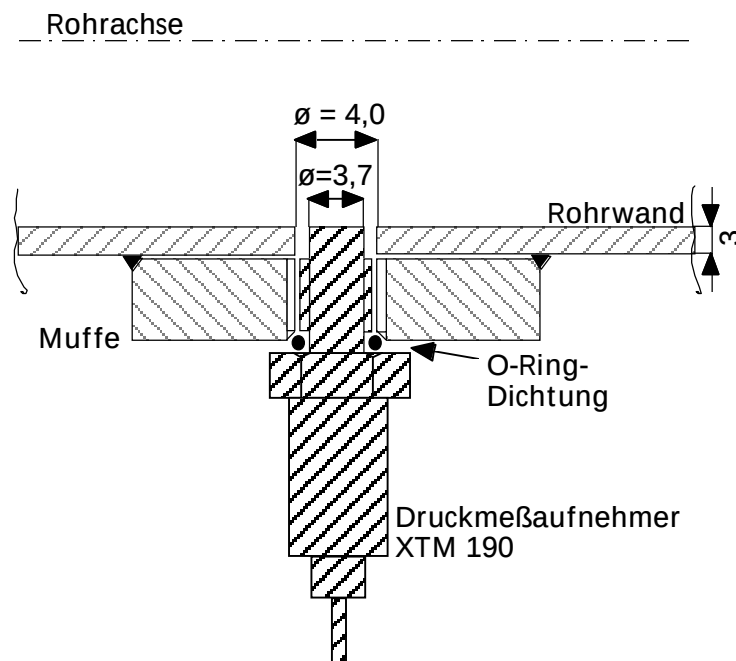


Abb. 3: Einbau der Druckaufnehmer in der Versuchsanlage

## Transiente Kraftmessung

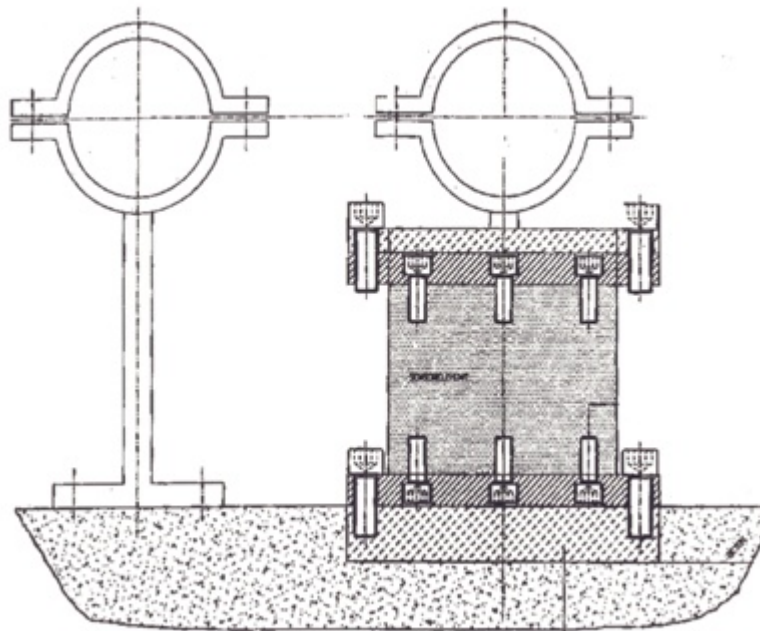


Abb. 4: Einbau der triaxialen Kraftaufnehmer in der Versuchsanlage

Das Messprinzip der dreiachsigen *Kraftaufnehmer* (Typ MAK 8000) beruht auf dem von Dehnungsmessstreifen. Die Messspannung wird durch einen schnellen Messverstärker im Gerät auf Normsignale (4 - 20 mA) umgewandelt. Durch werkseitigen Abgleich können äußere Kräfte in ihre räumlichen Bestandteile aufgelöst werden. Dies ist gegenüber einachsigen Kraftaufnehmern ein wesentlicher Vorteil, die Investitionskosten sind aber erheblich höher. Die Aufnehmer können an mehreren Positionen in der Anlage als Festpunkt eingebaut werden (s. Abbn. 4, 5). Um die Steifigkeit der Rohrbefestigung zu erhöhen, wurden die Rohrschellen am Aufnehmer mit zusätzlichen Verstreben verschweißt, sodass die durch Fluidkräfte in die Rohrlager eingebrachten Kräfte verlustfrei übertragen werden konnten. Durch den Einbau der Aufnehmer in einen Metallrahmen, der durch Fixierschrauben im Bereich von 30 cm axial verschiebbar ist (s. Abb. 5), können die durch Wärmedehnung entstehenden Krafteinträge kompensiert werden.

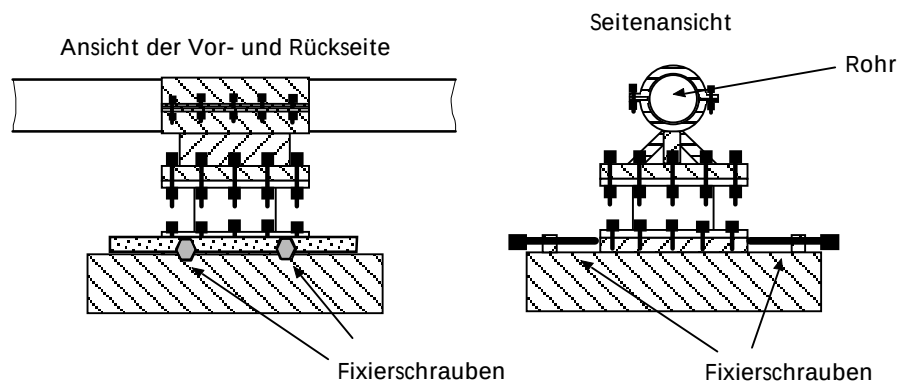


Abb. 5: Einbau der Kraftaufnehmer am Wendepunkt (FP2)

### *Transiente Messung der Phasenanteile*

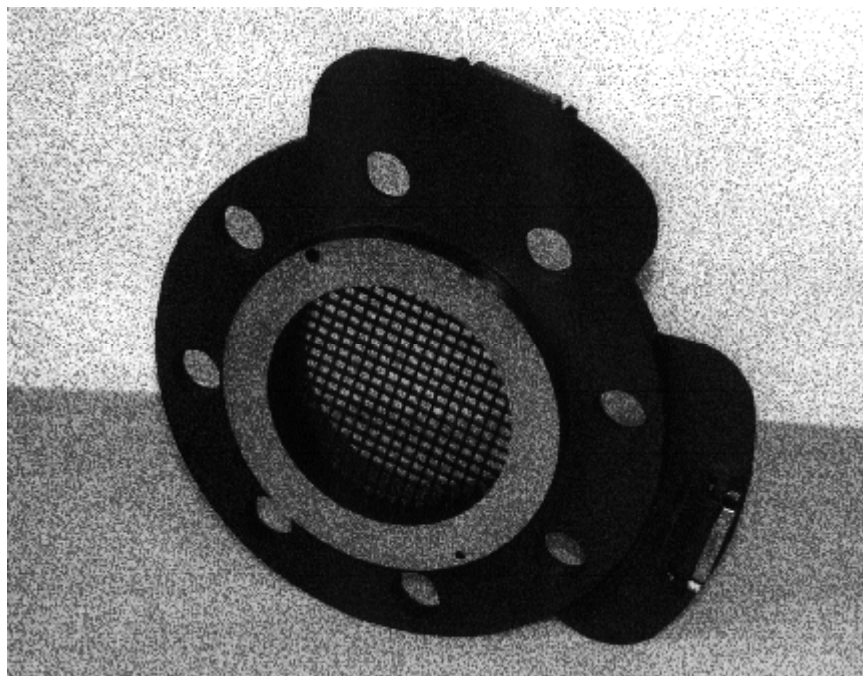


Abb. 6: Gittersensor 16 x 16, DN100, als Zwischenflanschausführung



Die vom Projektpartner FZR entwickelten *Leitfähigkeits-Gittersensoren* und *Nadelsonden* dienen der Untersuchung des Gas- oder Dampfanteils einer Strömung über dem Rohrquerschnitt. Mit Hilfe einer tomographischen Auswertemethode ist die Möglichkeit gegeben, die zweidimensionale Verteilung der Phasen in einer Gas-Flüssigkeitsströmung zu messen [3, 4].

Bei den Gittersensoren werden in einem Rohrquerschnitt (1. Ebene) Metalldrähte senkrecht zur Strömungsrichtung eingespannt. Auf einer zweiten Ebene werden weitere Metalldrähte, die im 90°-Winkel zu denen der ersten Ebene stehen, gespannt (s. Abb. 6). Somit erhält man eine Sender- und eine Empfänger-Ebene. Um eine Messung durchzuführen, werden alle Drähte der Senderebene einzeln und nacheinander mit einer Spannung belegt. Über die Empfängerebene wird die Leitfähigkeit an den Kreuzungspunkten der Drähte zwischen den Ebenen zeitgleich mit der Anregung gemessen. Somit wird ein Bild der vorhandenen Strömung erzeugt, wobei die Anzahl an Bildpunkten der Anzahl der Kreuzungspunkte entspricht. Bei einem Sensor mit 16 x 16 Drähten ergeben sich 256 Kreuzungspunkte über dem Rohrleitungsquerschnitt.

## Versuchsdurchführung

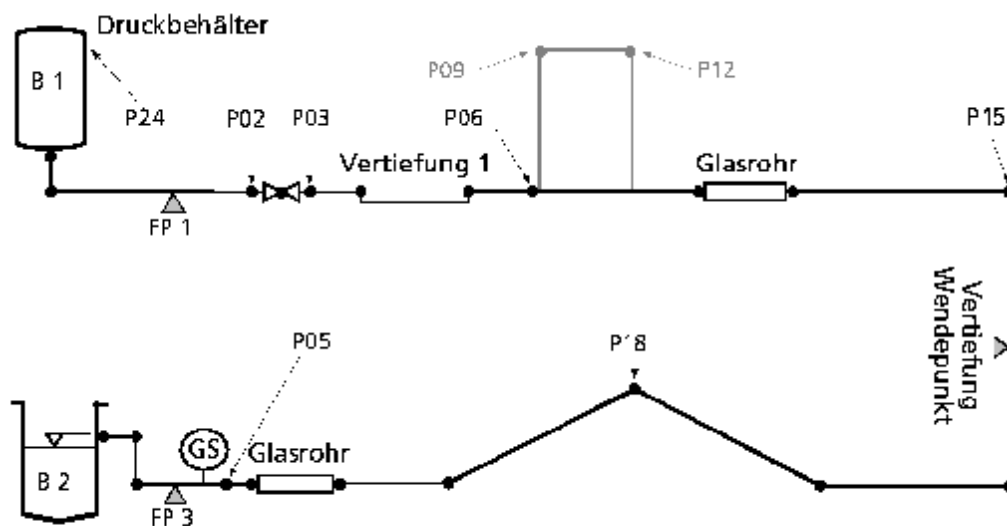


Abb. 7: Vereinfachtes R&I-Fließbild der Versuchsanlage für den Versuchsaufbau *Einströmen* mit charakteristischen axialen Einbau- und Messpositionen. (P01-23: Druckmessstellen, FP1-3: Kraftmessstellen, GS: Messstellen für Gittersensoren, Zahlenwerte *ohne* Rohrbrücke)

In Abb. 7 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Zur Zeit  $t = 0$  sind der Behälter B1 und der Teil der Versuchsleitung der Nennweite DN100 bis zum geschlossenen Kugelhahn bei der Position P02 auf den Anfangsdruck  $p_0$  vorgespannt. Stromabwärts der Armatur werden an der Vertiefung 1 oder im Bereich des Wendepunkts (FP2) definierte Volumina an Wasser vorgelegt. Bei Öffnen des Kugelhahns strömt Luft durch die Leitung und entspannt in den Auffangbehälter B2. Versuchsparameter sind

- § der Anfangsdruck (5 - 30 bar),
- § das Wasservolumen (20 - 65 l) und
- § die Rohrgeometrie (Rohrbrücke bzw. Bypass).

Messtechnisch werden die in Abb. 7 eingezeichneten, zeitlichen Druckverläufe (P24 - P05), die Reaktionskräfte am Festpunkt FP1 und am Wendepunkt sowie der Phasenanteil von Luft im Rohrleitungsquerschnitt durch einen Gittersensor (GS) in hoher zeitlicher Auflösung von 1kHz erfasst. Weiterhin konnte die Strömung durch zwei Glasrohre beobachtet werden.

## Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

### *Zeitliche Druckverläufe*

Abb. 8 zeigt die zeitlichen Druckverläufe des Behälterdrucks und ausgewählter Messstellen in der Rohrleitung bei einem Abblaseversuch. Der Behältervordruck betrug 15 bar, es wurden 49 l Wasser an der Vertiefung 1 vorgelegt. Die Rohrbrücke wurde durch ein axiales Rohrelement ersetzt (axiale Messpositionen vgl. Abb. 7). Weiterhin ist der zeitliche Verlauf des Behälterdrucks bei einem Versuch ohne Wasservorlage dargestellt.

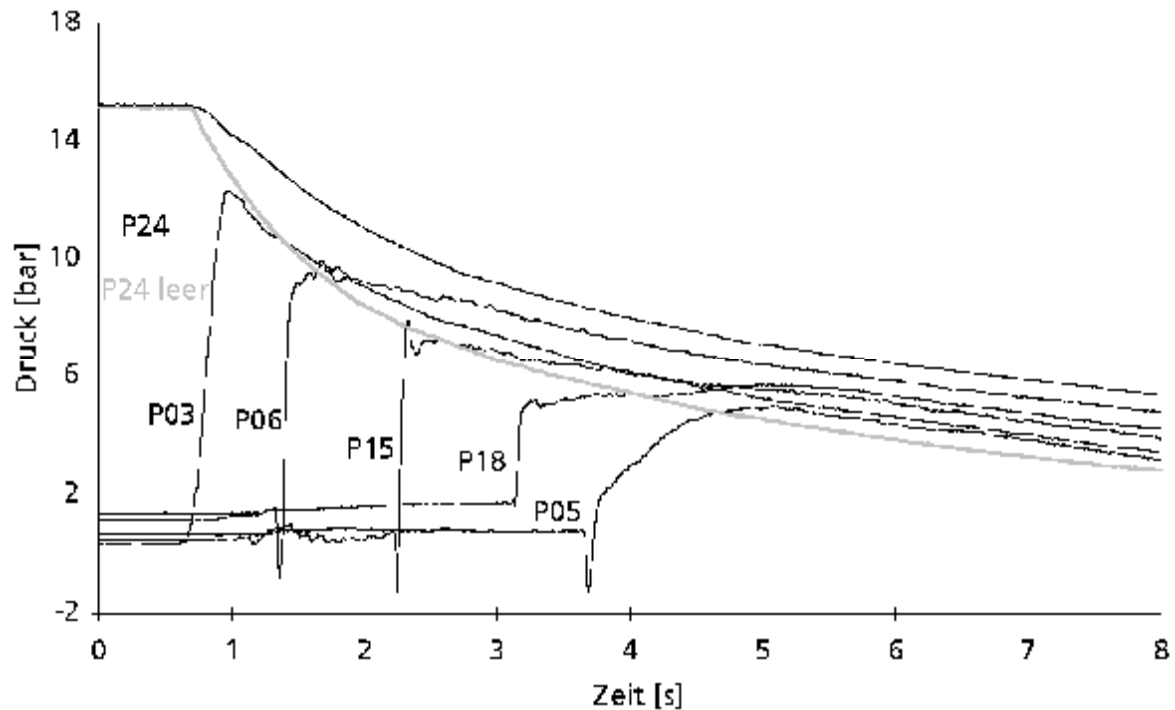


Abb. 8: Zeitlicher Druckverlauf beim BlowDown ohne Rohrbrücke; Behältervordruck: 15 bar, Wasservorlage an Vertiefung 1: 49 l; Versuch: 15ba08d1; Behälterdruck ohne Wasservorlage (grauer Kurvenverlauf, P24)

Nach dem schnellen Öffnen des Kugelhahns DN100 ( $t = 0 - 0,5$  s) fällt der Behälterdruck P24 kontinuierlich ab, jedoch erheblich langsamer als bei einem Versuch ohne Wasser in der Leitung (P24 - grauer Kurvenverlauf). So betragen die  $t_{50}$  - Zeiten mit Wasser 6 s, ohne Wasser 3 s.

Der Druck an der Messstelle P03 (unmittelbar stromabwärts des Kugelhahns) steigt rasch bis auf etwa 12 bar und nähert sich dem Behälterdruckverlauf (abzüglich der Rohrreibungsverluste). Der Druckabfall führt zu einer starken Abkühlung des Gases auf rechnerisch (mit dem Programm Flowmaster ermittelt) weniger als  $-100^{\circ}\text{C}$ . Erheblich steiler sind die Druckanstiege an den Messpositionen P06, P15 und P18. Bei P05 (nach 180,7 m) wurden wiederum flachere Gradienten gemessen. Diese hohen Druckgradienten lassen auf die *Bildung eines Flüssigkeitspfropfens* schließen. Dies wurde mit dem bei der axialen Position  $x = 186,8$  m installierten Gittersensor (s. Abb. 9) mit dieser Versuchsanordnung (also ohne Rohrbrücke) bei Antriebsdrücken oberhalb von 25 bar verifiziert.

Abb. 9 stellt den zeitlichen Verlauf der Phasenanteile Luft und Wasser in der Rohrmitte dar (Bild 1: gesamter Versuch; Bild 2: zeitlicher Ausschnitt). In den unteren Bildern 3, 4 und 5 ist der gesamte Rohrleitungsquerschnitt zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Man erkennt, dass der Flüssigkeitspfropfen, gebildet bei der axialen Position  $x = 16$  m, bei dieser Versuchsanordnung (180 m horizontale Leitungsführung; 35 m 15°-Steigungen) noch nach 180 m im System stabil ist. Mit der weiter unten abgeschätzten Geschwindigkeit von 30 m/s ergibt sich die Länge des Flüssigkeitskerns zu etwa 3 m. Einschränkend muss darauf hingewiesen werden, dass Gasblasen von weniger als etwa 0,5 cm vom eingesetzten Gittersensor möglicherweise nicht erfasst werden. Der Kern wird gemäß den Bildern 3 und 5 von einer Sprühströmung flankiert. Die durch Glasrohre optisch erfasste Filmströmung (Flüssigkeit an der RL-Wand) am Ende der Versuche wurde durch den Sensor nicht wiedergegeben.

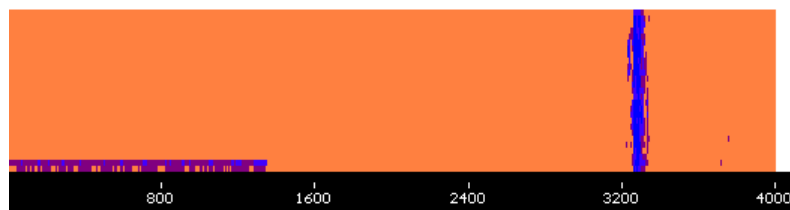


Bild 1:  
 $0 < t < 4s$

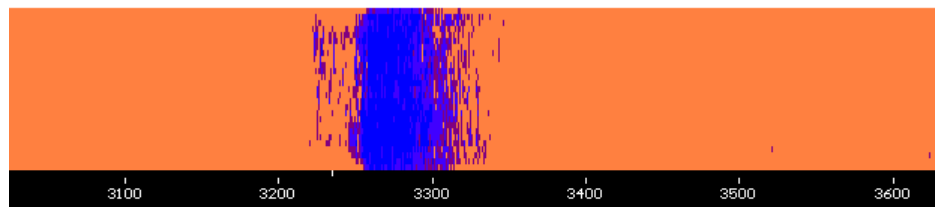
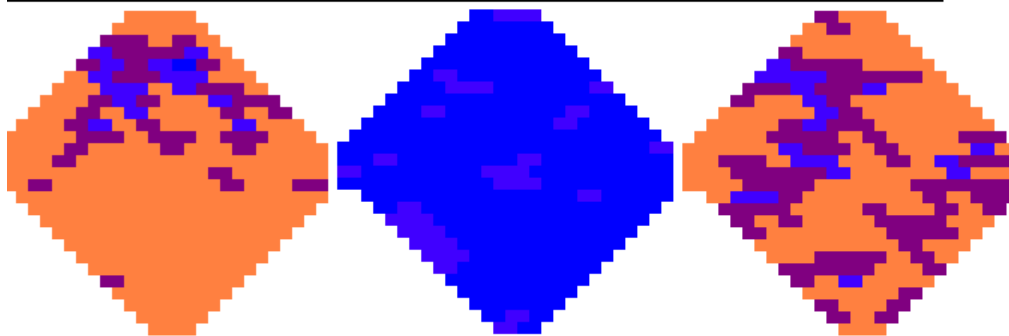


Bild 2:  
 $3 < t < 3,6s$



Bilder 3-5:  
 Rohr-  
 querschnitt

$t = 3236$  ms

$t = 3276$  ms

$t = 3331$  ms

Abb. 9: Zeitliche Verläufe von Luft (hell) und Wasser (dunkel) beim Versuch 30ba12d:

### Zeitliche Kraftverläufe

Bei der Umlenkung am Wendepunkt (FP2) werden die in Abb. 10 dargestellten zeitlichen Kraftverläufe gemessen. Analog zum Druckanstieg (linke Achse) erfolgt der Krafteintrag in das Festlager (30 kN in Querrichtung KX2, Versuch: 15ba08d1, vgl. Abb. 8). Der Kraftverlauf in axialer Richtung (KY2) beginnt zunächst mit einem Anstieg in negative Richtung (Aufreffen des Pfropfens am ersten 90 °- Bogen) und wechselt in positive Richtung mit dem Erreichen des zweiten Bogens.

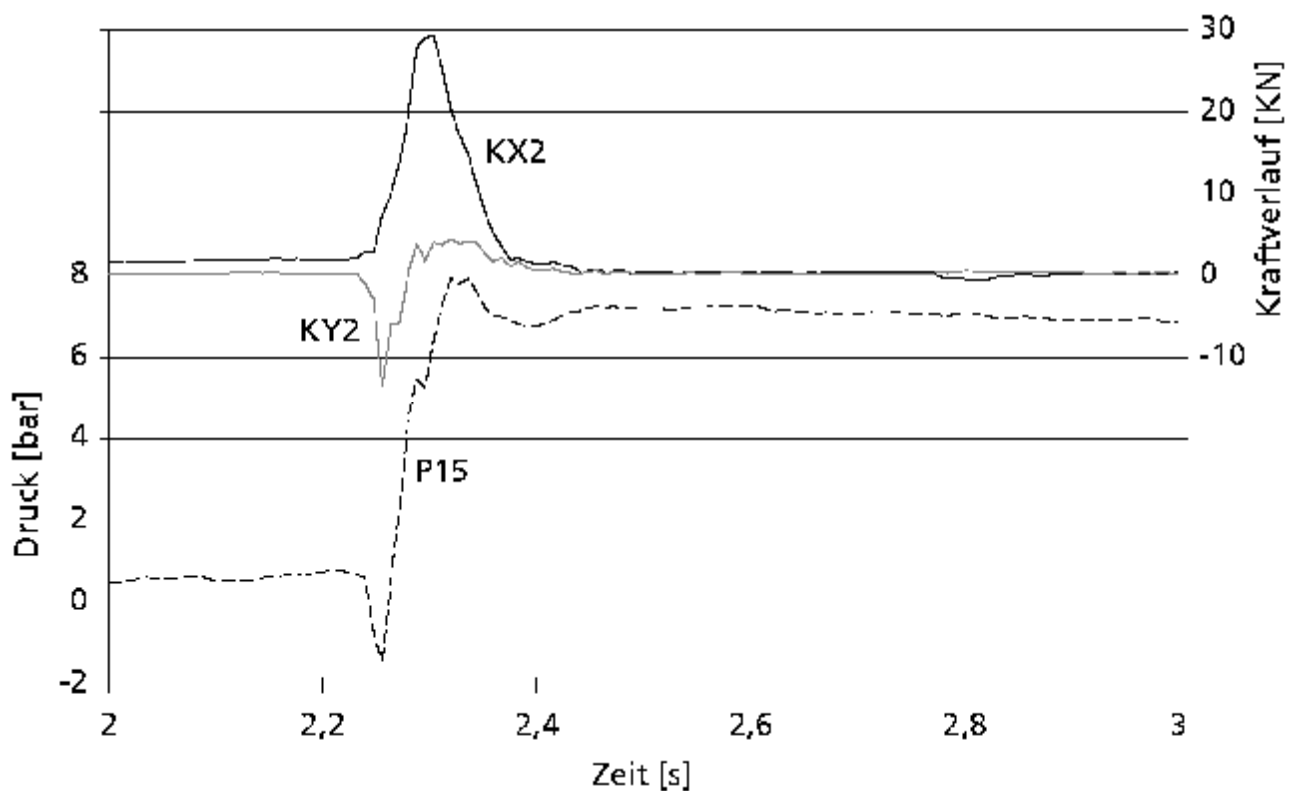


Abb. 10: Zeitlicher Kräfteverlauf beim BlowDown ohne Rohrbrücke, Behältervordruck: 15 bar, Wasservorlage: 49 l (Versuch: 15ba08d1)

### Einfluss senkrechter Leitungsabschnitte

Abb. 11 zeigt die zeitlichen Druckverläufe für einen Anfangsdruck von 15 bar mit Rohrbrücke. Es wurden ebenfalls 49 l Wasser in der ersten Vertiefung vorgelegt (vgl. Abb. 8). Im Unterschied zum Betrieb ohne Rohrbrücke (vgl. Abb. 8) ist ein sprunghafter Anstieg des Drucks an den Messstellen P06 und P09 auf Beträge oberhalb des Behältervordrucks zu erkennen. Die Druckantworten sind denen der Druckstöße z.B. beim schnellen Absperren flüssigkeitsfördernder Rohrleitungen ähnlich (vgl. /5/). Diese Versuchsanordnung führt zu den in Abb. 12 dargestellten zeitlichen Kraftverläufen.

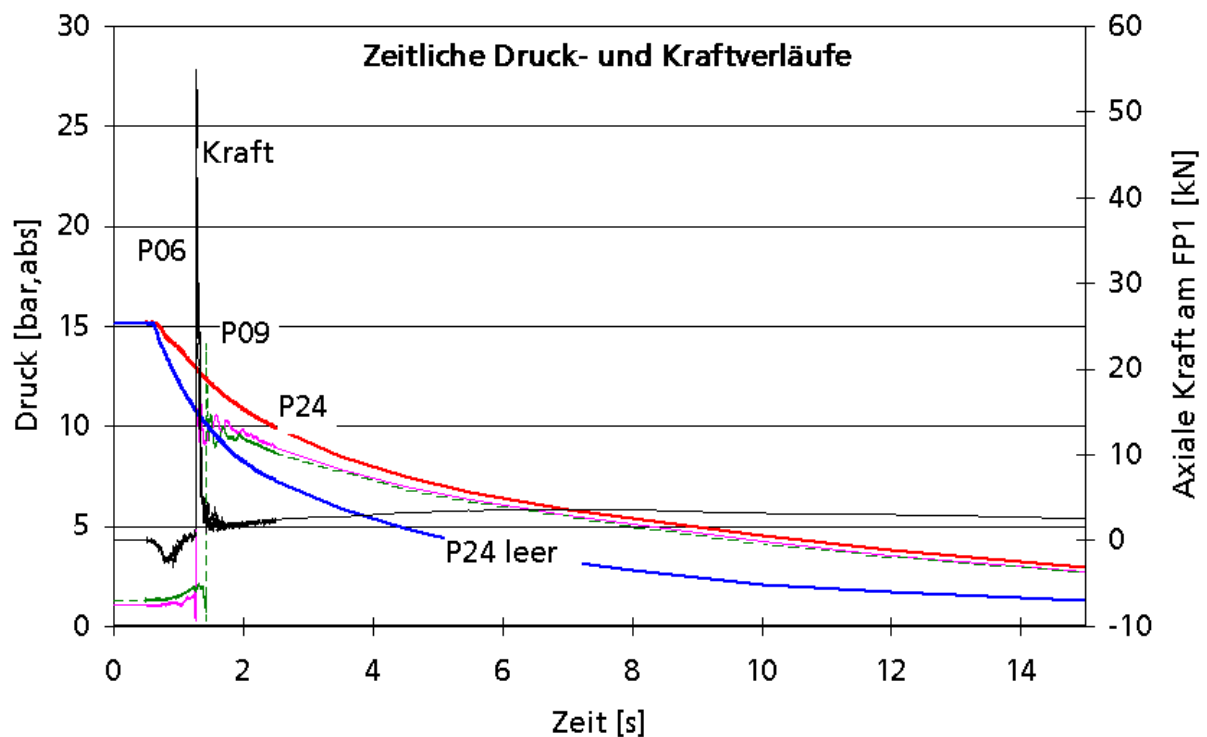


Abb. 11: Zeitliche Druckverläufe beim Blowdown mit Rohrbrücke, Behältervordruck: 15 bar, Wasservorlage: 49 l an Vertiefung 1 (Versuch: 15ba17d1)

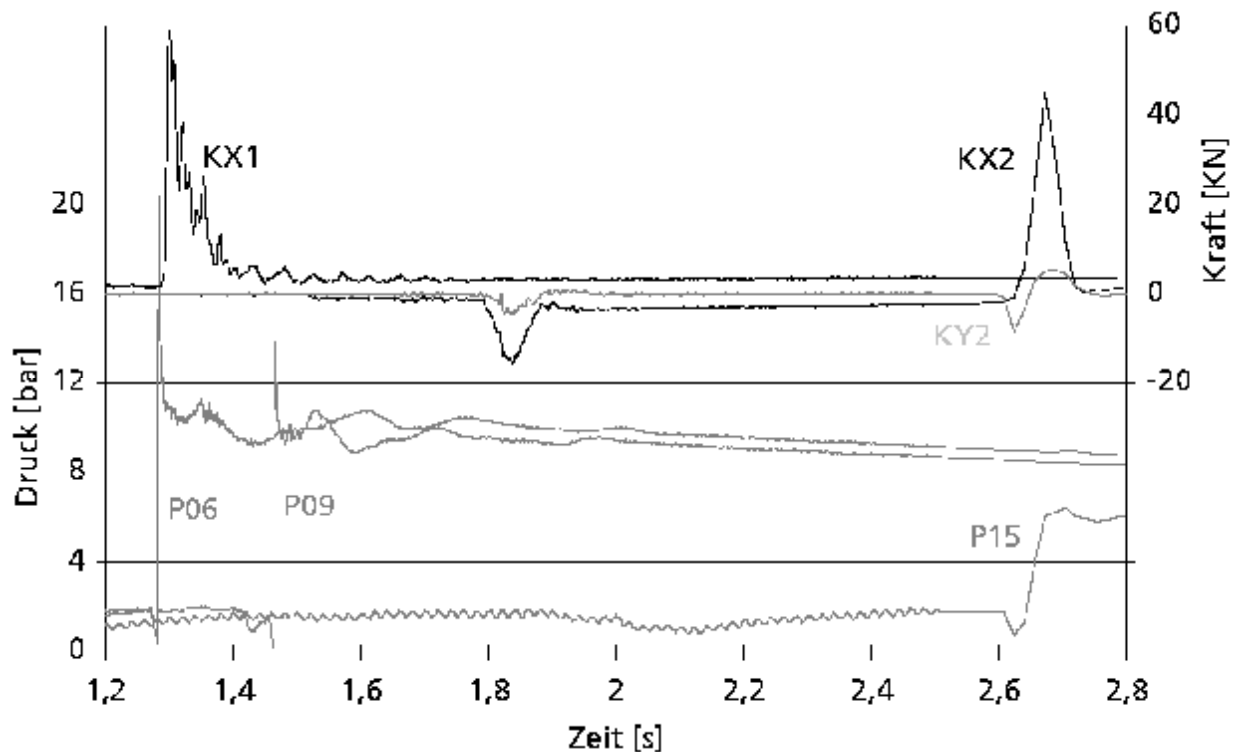


Abb. 12: Zeitlicher Kräfteverlauf beim BlowDown mit Rohrbrücke, Behältervordruck: 15 bar, Wasservorlage: 49 l an Vertiefung 1 (Versuch: 15ba17d1)

Wenn Flüssigkeit auf den ersten Rohrbogen der Rohrbrücke trifft ( $t = 1,3$  s), wirkt auf den vorderen Kraftaufnehmer (FP1) ein axialer Kraftbetrag von etwa 58 kN (KX1). Die Kraftausschläge während des Kraftabfalls resultieren aus der Schwingungsbewegung der Rohrleitung im Bereich der Rohrbrücke. Nach 1,8 s erfolgt ein Kraftanstieg in negative x- und y-Richtung des Kraftaufnehmers 2 (FP2 am Wendepunkt); das ist die Reaktionskraft durch Umlenkung des Pfropfens am unteren Rohrbogen der Falleitung. Der nachfolgende Kraftverlauf durch die Umlenkung am Wendepunkt entspricht dem der Versuche ohne Rohrbrücke. Die maximale Kraftamplitude ist um 20 kN größer, was darauf schließen lässt, dass die Pfropfenbildung durch senkrechte Leitungsabschnitte erheblich begünstigt wird.

## Mathematische Beschreibung der Blowdown-Versuche

Im vorigen Abschnitt wurden die gemessenen Druck- und Kraft-Zeitverläufe bei einem beschleunigten Flüssigkeitstransport durch eine Gasleitung dargestellt. In der Rohrleitung befindliche Flüssigkeit wird durch einen heranströmenden Gas- oder Dampfstrom aufgrund der hohen Gasgeschwindigkeit aufgestaut und als Flüssigkeitspfropfen mit erheblicher Geschwindigkeit durch das System beschleunigt. In diesem Abschnitt werden Aussagen über die auf Umlenkungen wirkende Flüssigkeitsmasse und deren Geschwindigkeit unter verschiedenen Versuchsbedingungen gemacht (Leistungsgeometrie, Anfangsdruck und Menge an vorgelegtem Wasser).

### *Pfropfengeschwindigkeit*

Aus den Abständen der Messpositionen und den gemessenen zeitlichen Druckverläufen kann die Geschwindigkeit des Pfropfens bestimmt werden. In Abb. 13 sind die maximalen Pfropfengeschwindigkeiten für verschiedene Behältervordrücke dargestellt.



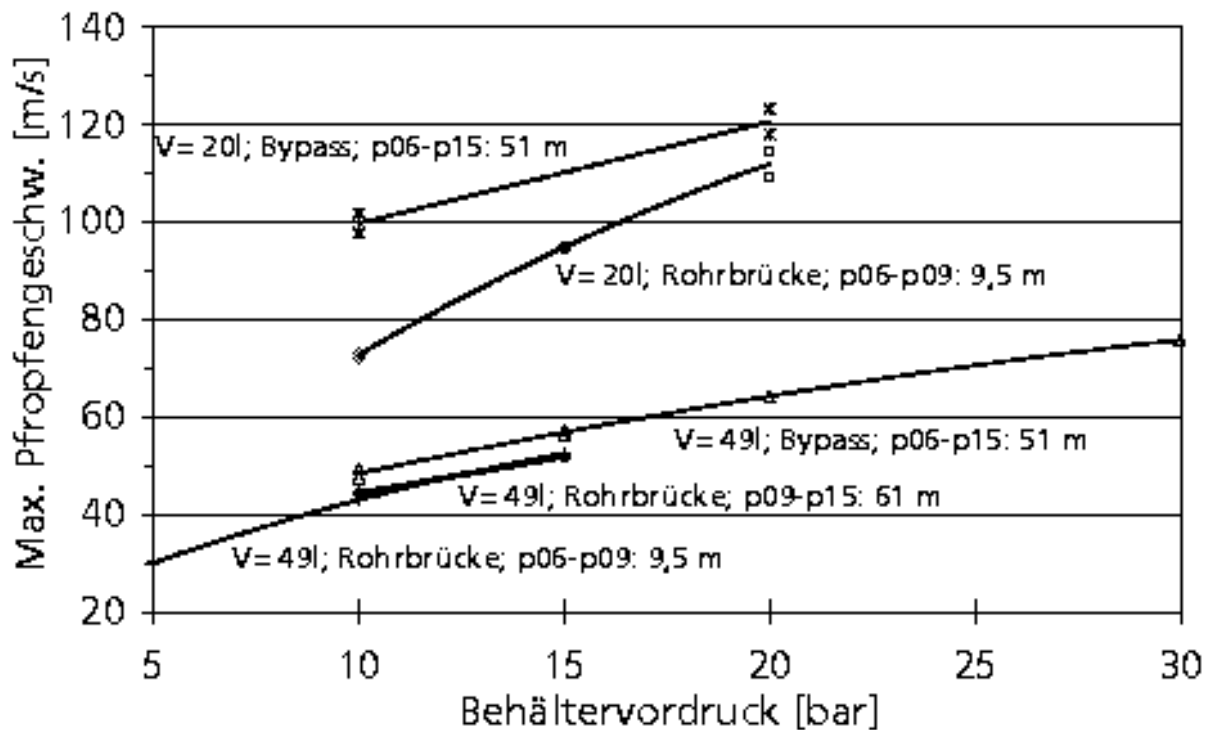


Abb. 13: Maximale Pfropfgeschwindigkeit zwischen unterschiedlichen Messstellen in Abhängigkeit vom Behältervordruck, Parameter: vorgelegtes Wasservolumen, Leitungsgeometrie

In dieser Abbildung erkennt man deutlich, dass der Flüssigkeitspfropfen mit erheblichen Geschwindigkeiten durch die Rohrleitung bewegt wird. Die beiden unteren Kurven zeigen die maximal gemessenen Geschwindigkeiten bei einer vorgelegten Menge von 49 l Wasser, an der Rohrbrücke (P06-P09) und am Wendepunkt (P15). Schon bei einem Behältervordruck von 5 bar erreicht der Pfropfen eine Geschwindigkeit von ca. 30 m/s. Bei 10 bar beträgt sie schon 44 m/s und bei 15 bar bereits 52 m/s. Die Geschwindigkeiten bei gleichen Vordrücken sind an der Rohrbrücke und am Wendepunkt fast gleich groß. Der darüberliegende Kurvenverlauf stellt die maximale Geschwindigkeiten am Wendepunkt beim Versuchsbetrieb ohne Rohrbrücke dar. Die Geschwindigkeiten bei 10 und 15 bar entsprechen annähernd den beiden unteren Kurven. Bei einem Vordruck von 30 bar ergibt sich eine max. Geschwindigkeit von rund 76 m/s. Noch größer werden die Geschwindigkeiten, wenn das vorgelegte Wasservolumen abnimmt (beide oberen Kurven). Am Wendepunkt wurden Maximal-Geschwindigkeiten von 120 m/s bei einem Behältervordruck von 20 bar

gemessen. Die Geschwindigkeiten an der Rohrbrücke sind durch die darunterliegende Kurve dargestellt. Beide Kurven sind nicht wie beim vorgelegten Wasservolumen von 49 l identisch. Dies resultiert aus der weitaus stärkeren Verwirbelung des Pfropfens beim Betrieb ohne Rohrbrücke aufgrund seiner kleineren Anfangsmasse.

### *Effektive Pfropfenmasse*

Aus den Kraftverläufen lässt sich die wirkende Masse des Pfropfens an den Umlenkungspunkten nach einer Bilanzierung über den Kraftstoß unter den Voraussetzungen

- § konstante Geschwindigkeit,
- § starre, unbewegte Rohrleitung,
- § der Pfropfen besteht nur aus Flüssigkeit,

wie folgt berechnen.

Nach anfänglicher Beschleunigung des Pfropfens bewegt sich dieser für einige Sekunden mit annähernd konstanter Geschwindigkeit weiter. Bei einer Umlenkung des Pfropfens übt dieser einen Kraftstoß aus. Der auftretende zeitliche Verlauf der Kraft ist ein Maß für die wirkende Masse des Pfropfens. Eine Herleitung ist über den Impulssatz möglich.

$$I = m \cdot v \quad \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right], [\text{N} \cdot \text{s}] \quad (\text{Gl. 6-1})$$

Der Impuls  $I$  ändert sich unter dem Einfluss einer Kraft  $F$  gemäß

$$F = \frac{dI}{dt}. \quad (\text{Gl. 6-2})$$

Die Wirkung der Kraft  $F$  im Zeitintervall  $dt$  bezeichnet man als Kraftstoß

$$\int_{t_1}^{t_2} F(t) dt = \int_{I_1}^{I_2} dI = I_2 - I_1 = \Delta I \quad (\text{Gl. 6-3})$$

Unter der Annahme, dass die Geschwindigkeit des Pfropfens konstant bleibt ( $v = \text{const.}$ ) ergibt sich für die wirkende Masse des umgelenkten Pfropfens folgende Beziehung

$$m = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F(t) dt}{v} \quad . \quad (\text{Gl.6-4})$$

Mit der Rohrleitungsgeometrie und der Dichte der Flüssigkeit folgt

$$L_{\text{Pfropfen}} = \frac{4 \cdot m}{d^2 \cdot r \cdot \rho} \quad (\text{Gl. 6-5})$$

für die wirkende Länge des Pfropfens.

In Abb. 14 ist der Kraftverlauf für die Umlenkung des Pfropfens am unteren Rohrbogen zu Beginn der Rohrbrücke exemplarisch für den Versuch 15ba17d1 dargestellt. Die Kraft wurde durch den Kraftaufnehmer am Festpunkt1 (FP1) gemessen. Hierbei überwiegt die Axialkraft.

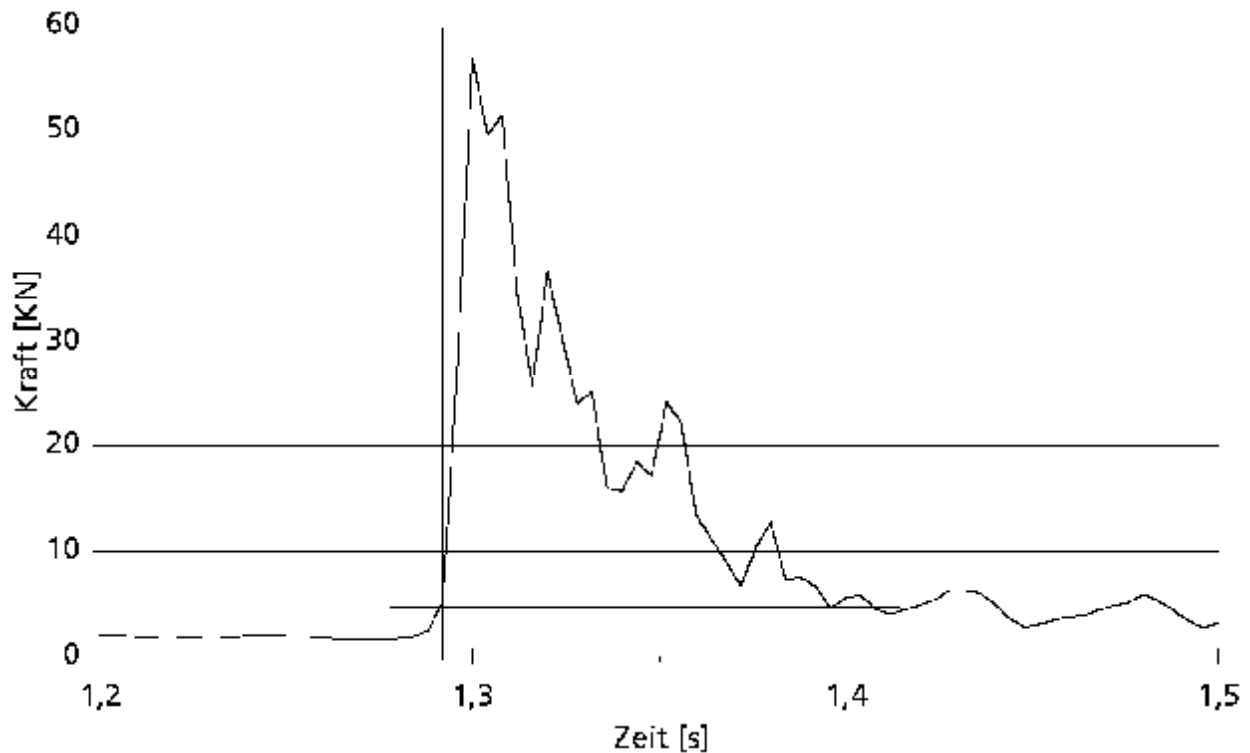


Abb. 14: Kraft in x-Richtung am vorderen Kraftaufnehmer (FP1) durch Umlenkung der Flüssigkeit am ersten Rohrbogen der Rohrbrücke (Versuch: 15ba17d1, Wasservorlage: 49 l an Vertiefung 1, Behältervordruck: 15 bar)

Gemäß Abb. 14 benötigt die Flüssigkeit etwa 0,1 s zur Durchströmung des 90 °-Bogens. Eine Integration der wirkenden Kraft, innerhalb der eingezeichneten Zeitintervalle, ergab eine Fläche von 2340 Ns; dies entspricht dem auftretenden Kraftstoß. Daraus ergibt sich gemäß Gln. 6-3 und 6-4 eine effektive Flüssigkeitsmasse von 44,5 kg. Die Geschwindigkeit des Flüssigkeitspfropfens wurde zuvor aus den axialen Positionen der Druckaufnehmer (P06-P09,  $\Delta x = 9,5$  m) zu 52,5 m/s ermittelt (vgl. Abb. 6).

In den Abbn. 15 und 16 sind die effektiven Massen der Flüssigkeitspfropfen als Pfropfenanteil aufgetragen (linke Achse). Der Pfropfenanteil wird hierbei als Verhältnis von effektiver, d.h. kraftauslösender Flüssigkeitsmasse im Verhältnis zur vorgelegten Wassermasse definiert. Auf der rechten Achse sind die Maximalbeträge der auf die Festpunkte FP1 und FP2 wirkenden Kräfte dargestellt. Die vorgelegte Wassermenge betrug 49 l an der Vertiefung 1, Parameter war die Geometrie (Abb. 15 mit, Abb. 16 ohne Rohrbrücke)

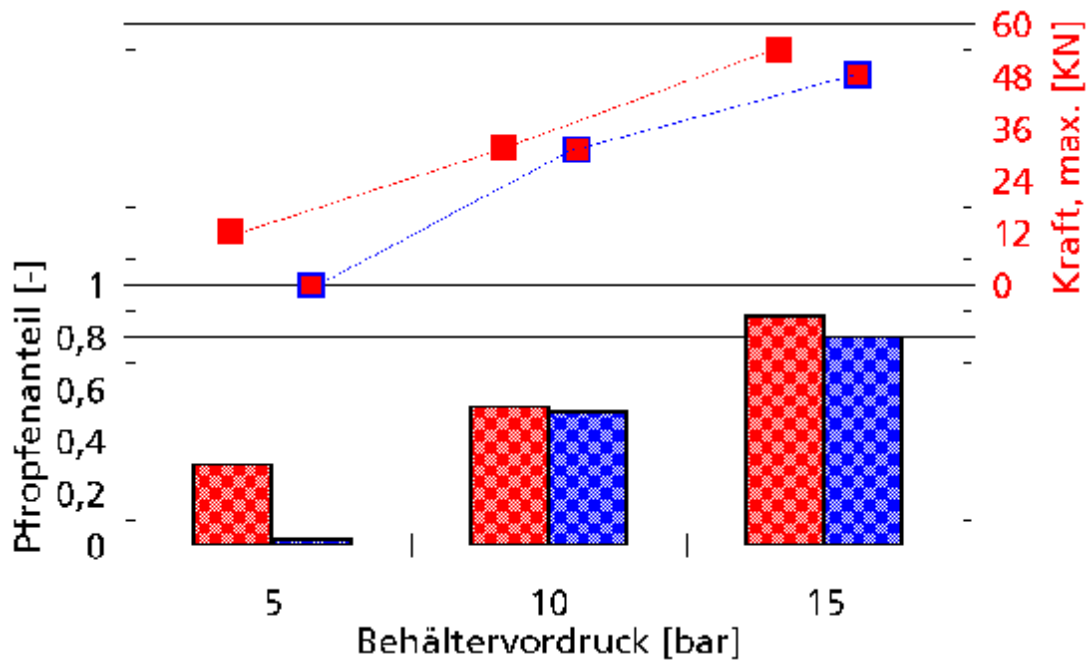


Abb. 15: Pfropfenanteil an der Rohrbrücke mit Maximalkraft am Festpunkt FP1 (schwarz) / Pfropfenanteil am Wendepunkt FP2 mit Maximalkraft (grau) in Abhängigkeit vom Behältervordruck mit Rohrbrücke

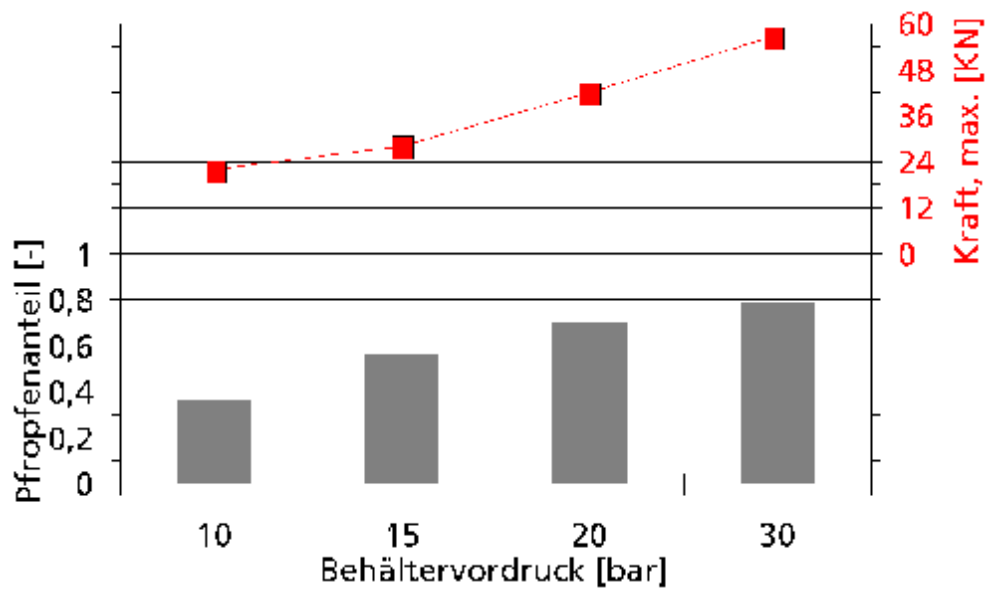


Abb. 16: Pfropfenanteil mit Maximalkraft am Wendepunkt (FP2) in Abhän-

gigkeit vom Behältervordruck, ohne Rohrbrücke

Aus den Abbn. 15 und 16 wird ersichtlich, dass mit zunehmendem Behältervordruck und durch senkrechte Leitungsabschnitte die Bildung eines Flüssigkeitspfropfens begünstigt wird. Als Folge der größeren wirkenden Masse ist somit auch eine Vergrößerung der Kraft verbunden.

### Modellierung der gasinduzierten Flüssigkeitsbewegung in Gas- / Dampfleitungen

Ziel des Modells ist es, durch einfache mathematische Ansätze den verzögerten Druckverlauf in einem abblasenden Behälter zu beschreiben, wenn Flüssigkeit in der Leitung vorhanden ist. Der mit Luft gefüllte, vorgespannte Behälter wird in eine mit Wasser teilgefüllte Rohrleitung entleert. Es wird auf die Anwendung von zweiphasigen Druckverlustmodellen verzichtet, da bisher keine genauere Kenntnis der Strömungsform vorliegt.

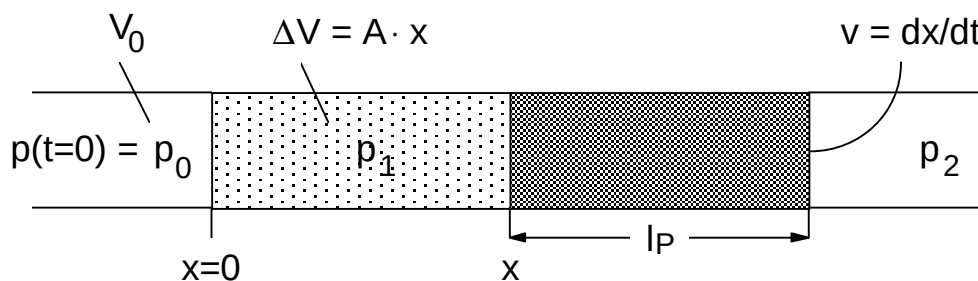


Abb. 17: Schematische, modellhafte Darstellung des Pfropfens in der Rohrleitung

Als Modellvoraussetzungen werden angenommen:

- § Der Pfropfen nimmt während des Vorgangs immer die gesamte Rohrquerschnittsfläche ein und behalte die konstante Pfropfenlänge  $l_P$ ,
- § Die Zustandsänderung im Gasraum verlaufe adiabatisch mit  $pV^\kappa = \text{const.}$ ,
- § Der Gegendruck  $p_2$  bleibt während des Vorganges konstant. (keine Reibung des verdrängten Gases),
- § Für die Rohrreibung des Pfropfens gelte das Widerstandsgesetz von MILLER. Der Widerstandsbeiwert für das Gas ist im untersuchten Druck-, Temperatur- und Geschwindigkeitsbereich konstant mit  $z_G = 0,015$  (s. Tab. 5).

|                       |         |
|-----------------------|---------|
| Druck [bar]           | 1 - 40  |
| Temperatur [°C]       | 20 -150 |
| Geschwindigkeit [m/s] | 10, 50  |

Tabelle 5: Versuchsbedingungen

Die Pfropfenbewegung wird aus den am Pfropfen angreifenden Kräften ermittelt. Die Bewegungsgleichung lautet

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = v \cdot \frac{dv}{dx} \rightarrow \frac{dv}{dx} = a. \quad (\text{Gl. 6.6})$$

Die Kräftebilanz um den Pfropfen liefert

$$F = (p_1 - p_2) \cdot A - (t_W \cdot p \cdot d \cdot L_P) - (t_G \cdot p \cdot d \cdot x). \quad (\text{Gl. 6-7})$$

Mit der Wandschubspannung

$$t = \frac{1}{8} \cdot z \cdot r \cdot v^2 \quad (\text{Gl. 6-8})$$

ergibt sich

$$F = A \left[ (p_1 - p_2) - \left( z_W \cdot \frac{L_P}{2 \cdot d} \cdot r_W \cdot v^2 \right) - \left( z_G \cdot \frac{x}{2 \cdot d} \cdot r_G \cdot v^2 \right) \right]. \quad (\text{Gl. 6-9})$$



Bei einer adiabaten Zustandsänderung im Gasraum vor dem Pfropfen kann das Gasvolumen wie folgt berechnet werden

$$\frac{p_1}{p_0} = \left( \frac{V_0}{V_1} \right)^c \quad (\text{Gl. 6-10})$$

$$V_1 = V_0 + A \cdot x \rightarrow \frac{V_0}{V_1} = \frac{V_0}{V_0 + A \cdot x} = \left( 1 + \frac{A \cdot x}{V_0} \right)^{-1}$$

Setzt man  $\frac{p_1}{p_0} = \left( 1 + \frac{A \cdot x}{V_0} \right)^{-c} \equiv a$ , kann der Druck stromaufwärts des Pfropfens wie folgt bestimmt werden

$$p_1 = a \cdot p_0 \quad . \quad (\text{Gl. 6-11})$$

Man erhält die Beschleunigung des Pfropfens zu

$$a = \frac{F}{m} = \frac{F}{r_W \cdot L_P \cdot A} = \frac{(p_0 \cdot a - p_2)}{r_W \cdot L_P} - z_W \cdot \frac{v^2}{2 \cdot d} - z_G \cdot \frac{x \cdot r_G \cdot v^2}{2 \cdot d \cdot r_W \cdot L_P} \quad (\text{Gl. 6-12})$$

und, mit einer sich verändernden Dichte des Gasraums gemäß

$$r_G = \frac{m_G}{V} = \frac{r_{G0} \cdot V_0}{V_0 + A \cdot x}$$

$$a = \frac{(p_0 \cdot a - p_2)}{r_W \cdot L_P} - \frac{v^2}{2 \cdot d} \left[ z_W + (z_G \cdot x) \cdot \left( \frac{V_0}{V_0 + A \cdot x} \cdot \frac{r_{G0}}{r_W \cdot L_P} \right) \right] \quad (\text{Gl. 6-13})$$

Somit lassen sich die Bewegungsgesetze für die zurückgelegte Strecke und Zeit

des Pfropfens in der Rohrleitung ableiten

$$\frac{dv}{dx} = \frac{(p_0 \cdot a - p_2)}{v \cdot r_W \cdot L_P} - \frac{v}{2 \cdot d} \left[ z_W + (z_G \cdot x) \cdot \left( \frac{V_0}{V_0 + A \cdot x} \cdot \frac{r_{G0}}{r_W \cdot L_P} \right) \right]$$

bzw.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(p_0 \cdot a - p_2)}{r_W \cdot L_P} - \frac{v^2}{2 \cdot d} \left[ z_W + (z_G \cdot x) \cdot \left( \frac{V_0}{V_0 + A \cdot x} \cdot \frac{r_{G0}}{r_W \cdot L_P} \right) \right]$$

Der Rohrreibungskoeffizient der Flüssigkeit kann aufgrund der konstanten Reynoldszahl mit folgender Gleichung berechnet werden

$$z_W = \frac{0,25}{\left( \log_{10} \left( \frac{k_r}{3,7 \cdot d} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right)^2}$$

(Gl. 6-14)

mit der Rohrrauigkeit  $k_r \approx 3 \cdot 10^{-5}$ .

Bei den experimentellen Versuchen im Rohrleitungssystem wurden Pfropfengeschwindigkeiten von weit über 30 m/s gemessen. Unter Berücksichtigung dieser Versuchsparameter ist es zulässig,  $z_G$  vereinfachend als konstant zu setzen ( $z_G = 0,015$  bei  $k/d = 0,0003$ ).

In Abb. 18 werden die berechneten Druckverläufe eines abblasenden Behälters mit denen in der Versuchsanlage ermittelten zeitliche Druckverläufen vergleichend dargestellt.

Die gestrichelten Kurvenverläufe in Abb. 18 stellen den berechneten Druckverlauf des Pfropfens mit einer Länge von 5,32 m dar. Wie aus der Abbildung zu entnehmen ist, werden die Messwerte von dem Modell recht gut wiedergegeben. Bei höheren Anfangsdrücken erfolgt der berechnete Druckabfall schneller als der gemessene. Für einen abzusichernden Behälter bedeutet dies eine nicht konservative Berechnung. Für die Bemessung von Rohrhalterungen stellt dieser Kurvenverlauf eine konservative Auslegung dar, da mit schnellerem Druckabbau ebenfalls höhere Geschwindigkeiten in der Rohrleitung berechnet werden.

Gründe dafür sind im Folgenden zusammengefasst

- § Die Reibung des verdrängten Gases in der Leitung wird im Modell nicht berücksichtigt.
- § Der Flüssigkeitspfropfen wird von einer Zweiphasenströmung flankiert, die einen höheren Druckverlust als die Einphasenströmung besitzt.

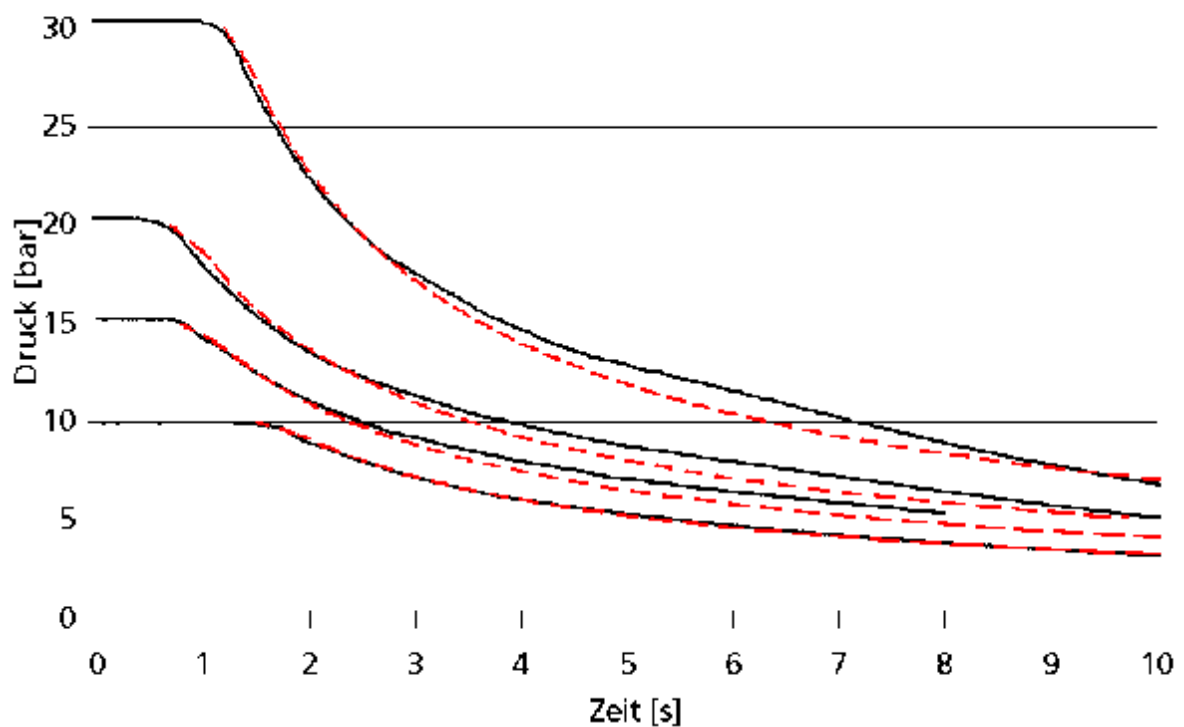


Abb. 18: Gemessener und berechneter zeitlicher Druckverlauf in Abhängigkeit vom Behältervordruck P24; durchgezogene Kurven: gemessen; gestrichelte Kurvenverläufe: gerechnet, Wasservorlage: 49 Liter Wasser, Pfropfenlänge 5,32 m

## Literatur

- [1] Raschke, E.; Salla, M.; Hültenschmidt, W.: Druckstoß gedämpft, Rohrleitung geschützt; Verfahrenstechnik Nr. 7 - 8, 1997, S. 45 - 49
- [2] Dudlik, A.; Schlüter, S.; Prasser, H.-M.: Transiente Strömungen in Rohrleitungen, in: VDI-Bericht Nr. 1359; VDI-Verlag, 1997
- [3] Prasser, H.-M.; Böttger, A.; Zschau, J.: "A New Wire-Mesh Tomograph for Gas-Liquid Flows", held on: Frontiers in Industrial Process Tomography II, Delft, The Netherlands, April 9-12, 1997, proceedings pp. 109-112
- [4] Prasser, H.-M.; Böttger, A.; Zschau, J.: Entwicklung von Zweiphasenmeßtechnik für vergleichende Untersuchungen zur Beschreibung von transienten Strömungsvorgängen in Rohrleitungen; Abschlußbericht zum BMBF-Vorhaben Nr. 11ZF9504/1, August 1998
- [5] Dudlik, A.; Schlüter, S.: Druckstöße und Kavitationsschläge infolge schnell schließender Armaturen; Industriearmaturen Nr. 3, September 1998, S. 195-200