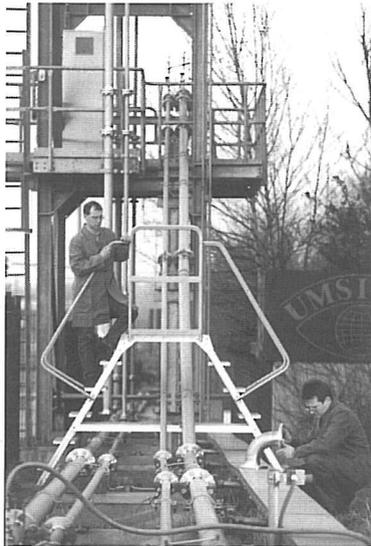




Fraunhofer Institut
Umwelt-, Sicherheits-,
Energietechnik UMSICHT

UMSICHT- Schriftenreihe Band 20



Andreas Dudlik

Vergleichende Untersuchungen
zur Beschreibung von transienten
Strömungsvorgängen in Rohr-
leitungen

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Institut
für Umwelt-, Sicherheits- und
Energietechnik UMSICHT
- Bibliothek -

~~200 USR.000~~
280 USR.20

Osterfelder Straße 3
D-46047 Oberhausen

Fraunhofer-Institut
für Umwelt-, Sicherheits- und
Energietechnik UMSICHT
- Bibliothek -

Osterfelder Straße 3
D-46047 Oberhausen

Fraunhofer-Institut für
Umwelt-, Sicherheits-
und Energietechnik UMSICHT

UMSICHT-Schriftenreihe Band 20

Vergleichende Untersuchungen
zur Beschreibung von transienten
Strömungsvorgängen in Rohr-
leitungen

von Andreas Dudlik

Fraunhofer IRB Verlag

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für
Umwelt-, Sicherheits-
und Energietechnik UMSICHT
Osterfelder Straße 3, D-46047 Oberhausen
Telefon (02 08) 85 98 - 0
Telefax (02 08) 85 98 - 290
e-mail info@umsicht.fhg.de
URL <http://www.umsicht.fhg.de>

D 290

Zugl.: Dortmund, Univ. Diss., 2000

Druck: Satz- und Druckcenter des Fraunhofer-Informationszentrums
Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

© by Fraunhofer IRB Verlag, 2000, ISBN 3-8167-5550-X
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, D-70569 Stuttgart
Telefon (07 11) 970 - 2500
Telefax (07 11) 970 - 2508
e-mail irb@irb.fhg.de
URL <http://www.irb.fhg.de>

Vergleichende Untersuchungen zur Beschreibung von transienten Strömungsvorgängen in Rohrleitungen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

vom Fachbereich Chemietechnik der Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Andreas Dudlik

aus

Dortmund

Tag der mündlichen Prüfung: 07. 12. 1999

1. Gutachter: Prof. Dr. Weinspach

2. Gutachter: Prof. Dr. Schmidt-Traub

Dortmund 1999

In dieser Arbeit wird der Einsatz unterschiedlicher Software zur Berechnung von instationären Strömungszuständen von ein- und zweiphasigen Gas-, Dampf- und Flüssigkeitsströmungen in Rohrleitungen bei Umgebungstemperaturen untersucht und bewertet. Bei den Flüssigkeiten handelt es sich um Stadtwasser und wässrige Polyethylenglykollösungen (PEG3000).

Das wichtigste Bewertungskriterium ist die Übereinstimmung der Vorhersagen mit den an einer Versuchsanlage ermittelten Ergebnissen zu folgenden Szenarien:

- Schnelles Schließen und Öffnen von Armaturen in flüssigkeitsfördernden Leitungen,
- Schnelle Regelvorgänge von Armaturen in flüssigkeitsfördernden Leitungen,
- Einströmen von Gas und Flüssigkeit in leere (luftgefüllte) Leitungen und
- Einströmen von Gas in mit Flüssigkeit teilgefüllte Rohrleitungen.

Die Szenarien werden von den Programmen mit in der Reihenfolge der Szenarien abnehmenden Genauigkeiten wiedergegeben. Daher wird zum Einströmen von Gas in mit Flüssigkeit teilgefüllte Rohrleitungen ein eigener Modellansatz entwickelt, mit dem eine gute Übereinstimmung zu den Experimenten erzielt wird.

Es wird ein neuartiges Verfahren zur Ermittlung von Armaturenkennlinien vorgestellt. Hiermit kann die Voraussage von Druckstößen in flüssigkeitsfördernden Rohrleitungen erheblich verbessert werden.

Ein zum Patent angemeldetes Verfahren zur Vermeidung von Druckstößen und Kavitations-schlägen wird vorgestellt und untersucht.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	1
1 Einleitung und Zielsetzung	4
2 Stand des Wissens	6
2.1 Ausbreitung von Druckwellen in Rohrleitungen.....	6
2.1.1 Instationäre Flüssigkeitsströmung in Rohrleitungen.....	7
2.1.2 Druckwellengeschwindigkeit in ein- und zweiphasigen Rohrströmungen.....	8
2.1.3 Fluid-Struktur-Wechselwirkungen.....	14
2.1.4 Line Packing - Flüssigkeitstransportleitungen mit hohem Druckgefälle.....	16
2.1.5 Ansammlung von Gasblasen an Leitungshochpunkten.....	17
2.2 Kavitationsvorgänge in Rohrleitungen.....	17
2.2.1 Dampfkavitation.....	18
2.2.2 Gaskavitation.....	20
2.2.3 Modellierung der Kavitationsvorgänge.....	21
2.3 Modellvergleich der Projektsoftware.....	23
3 Beschreibung der experimentellen Untersuchungen	25
3.1 Beschreibung der Versuchsanlage.....	25
3.2 Beschreibung der transienten Meßtechnik.....	27
3.2.1 Transiente Druckmessung.....	27
3.2.2 Transiente Kraftmessung.....	29
3.2.3 Transiente Messung der Phasenanteile.....	29
3.3 Versuchsdurchführung.....	30
3.3.1 Druckstöße und Kavitationsschläge in flüssigkeitsfördernden Rohrleitungen.....	30
3.3.2 Verhinderung von Kavitationsschlägen in flüssigkeitsfördernden Rohrleitungen.....	32
3.3.3 Druckstoßversuche mit höherviskosen Medien.....	33
3.3.4 Einströmen von Luft in leere und teilgefüllte Rohrleitungen.....	35
3.3.5 Einströmen von Wasser in eine leere Rohrleitung.....	35
4 Durchführung von Simulationen	36
4.1 Simulationsrechnungen mit FLOWMASTER2.....	36
4.2 Simulationsrechnungen mit MONA.....	39
5 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	40
5.1 Überprüfung des Meßsystems.....	40
5.1.2 Reproduzierbarkeit der Druck- und Kraftmessung.....	40
5.1.3 Stellungsrückmeldung der Armaturen.....	41
5.1.4 Der Einfluß großer Temperatursprünge auf die Druckmessung.....	42

5.2 Druckstöße und Kavitationsschläge in flüssigkeitsfördernden Rohrleitungen.....	43
5.2.1 Ermittlung der Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit.....	43
5.2.2 Zeitliche Druckverläufe beim Öffnen und Schließen von Armaturen.....	44
5.2.3 Einfluß der stationären Strömungsgeschwindigkeit.....	46
5.2.4 Einfluß der Leitungsgeometrie - Rohrleitungsdurchmesser.....	47
5.2.5 Einfluß der Leitungsgeometrie - Versuche ohne Rohrbrücke.....	49
5.2.6 Einfluß der axialen Einbauposition der Absperrarmatur.....	49
5.2.7 Einfluß unterschiedlicher Armaturentypen.....	50
5.2.8 Schnelle Regelvorgänge (Armaturenteilschluß).....	53
5.2.9 Krafteintrag in die Festpunkte FP1 und FP 2.....	54
5.2.10 Druckstoßversuche mit höherviskosen Medien.....	57
5.2.11 Strömungsvisualisierung.....	61
5.3 Maßnahmen zur Vermeidung von Druckstößen und Kavitationsschlägen.....	63
5.3.1 Einspeisung von Luft.....	63
5.3.2 Vergrößerung der Schließzeit.....	65
5.3.3 Vermeidung von Kavitationsschlägen mit Rückschlagklappen.....	66
5.4 Einströmen von Luft in eine leere und teilgefüllte Rohrleitung.....	67
5.4.1 Zeitliche Druckverläufe.....	67
5.4.2 Zeitliche Kraftverläufe.....	69
5.4.3 Einfluß senkrechter Leitungsabschnitte.....	70
5.5 Einströmen von Wasser in eine leere Rohrleitung.....	71
6 Ergebnisse der vergleichenden Simulationen.....	74
6.1 Druckstöße und Kavitationsschläge in flüssigkeitsfördernden Rohrleitungen.....	74
6.1.1 Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit.....	74
6.1.2 Vergleichende Simulationen mit dem Rechencode FLOWMASTER 2.....	75
6.1.3 Vergleichende Simulationen mit dem Rechencode MONA.....	84
6.1.4 Modell für die Ausdehnung der Kavitationsblase.....	88
6.2 Modellentwicklung zum Einströmen von Luft in eine teilgefüllte Rohrleitung.....	88
6.2.1 Pfropfgeschwindigkeiten.....	89
6.2.2 Effektive Pfropfenmasse.....	90
6.2.4 Modellierung der gasinduzierten Flüssigkeitsbewegung in Gasleitungen.....	93
6.3 Druckstoßberechnung mit Hilfe von instationären Armaturenkennlinien.....	96
7 Zusammenfassung.....	99
8 Literaturverzeichnis.....	101
9 Anhang.....	104

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung, Erläuterung
A	$[m^2]$	Fläche
a	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
c	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Schallgeschwindigkeit
w_L	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Partialdichte der gelösten Luft
w_{LS}	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	aktuelle Sättigungspartialdichte
$w_{LS,0}$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Sättigungspartialdichte bezogen auf Atmosphärendruck
c_p	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
d	$[m]$	Innendurchmesser
E	$\left[\frac{kg}{m \cdot s^2}\right]$	Elastizitätsmodul
F	$[N]$	Kraft
g	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Erdbeschleunigung
h	$\left[\frac{J}{kg}\right]$	Spezifische Enthalpie
I	$\left[\frac{kgm}{s}\right]$	Impuls
k_r	$[mm]$	Rohrrauigkeit
L_p	$[m]$	Pfropfenlänge
m	$[kg]$	Masse
w_{\max}	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	stationärer Endwert der volumenbezogenen freien Gasmasse
\dot{m}	$\left[\frac{kg}{s}\right]$	Massenstrom
N_{sec}	$[-]$	Anzahl an Rohrsektionen

Symbol	Einheit	Bedeutung, Erläuterung
\dot{w}	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right]$	Massenzuwachs an freiem Gas pro Volumen und Zeit
p	$[\text{Pa}]$	Druck
p_D	$[\text{Pa}]$	Dampfdruck
p_{druck}	$[\text{Pa}]$	Wert für das Druckniveau des Druckpeaks bei Schockwellen
R	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	Gaskonstante
Re	$[-]$	Reynoldszahl
r	$[\text{m}]$	Radius
s	$[\text{m}]$	Wanddicke
T	$[\text{K}]$	Temperatur
t	$[\text{s}]$	Zeit
V	$[\text{m}^3]$	Volumen
v	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	Geschwindigkeit
x	$[\text{m}]$	Abstand, Länge, Raumkoordinate
y	$[\text{m}]$	Abstand, Länge, Raumkoordinate
z	$[\text{m}]$	Abstand, Länge, Raumkoordinate

Griechische Symbole:

ϵ_R	$[-]$	Ringdehnung
ϵ_G	$[-]$	volumenspezifischer Gasgehalt
η	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$	dynamische Viskosität
χ	$[-]$	Adiabatexponent
μ	$[-]$	Querkontraktionszahl
ν	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$	kinematische Viskosität
ρ	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	Dichte
τ	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right]$	Wandschubspannung

Symbol	Einheit	Bedeutung, Erläuterung
ϑ	[°C]	Temperatur
σ_R	$\left[\frac{N}{m^2} \right]$	Ringspannung einer Rohrwand
ζ	[-]	Widerstandbeiwert
Θ	[-]	Wichtungsfaktor

Indices:

G	Gas
L	Flüssigkeit
Kav	Kavitation
2ph	zweiphasig
ab	abströmend
zu	zuströmend
M	Material
W	Wasser
0	stationär

1 Einleitung und Zielsetzung

Hervorgerufen durch eine plötzliche Änderung der Strömungsgeschwindigkeit treten in Rohrleitungssystemen Druckwellen („Druckstöße“) auf, deren Amplituden wesentlich höher sein können als die im stationären Betrieb vorliegenden Fluiddrücke. Diese sich mit hoher Geschwindigkeit von etwa 900-1500 m/s längs der Rohrleitung ausbreitenden Druckwellen entstehen hauptsächlich durch folgende Regel- und Stelleingriffe bzw. durch Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebs:

- Einströmvorgänge in Leitungen (bei der Inbetriebnahme),
- Ausfall von Pumpen/Kompressoren,
- Leckagen, Öffnungs- und Schließvorgänge von Armaturen,
- schnelle Druckentlastung von Behältern,
- schnelle Durchfluß-Regelungsvorgänge oder
- Rohrleitungsbruch bzw. Flanschabriß.

Die Auswirkungen der durch diese Szenarien erzeugten Druck- und Kraftspitzen sind seit langem bekannt und in der Literatur beschrieben - von Durchsatzschwankungen bei Abfüllvorgängen in der Getränkemittelindustrie, Schlägen in Wasserleitungen über Regelungsprobleme kompressorbetriebener Gasleitungen bis hin zu elastischen und plastischen Verformungen von Rohrunterstützungen und zu Leitungsbrüchen.

Die Analyse der Ursachen ist dagegen in der Regel aufwendig, da die experimentelle Untersuchung der Strömungsvorgänge aufgrund der hochfrequent zu erfassenden Meßgrößen Druck, Kraft, Geschwindigkeit und Phasenverteilung erst in letzter Zeit technisch möglich geworden ist. Der Aufwand richtet sich nach der Komplexität der in der Rohrleitung auftretenden Strömungsvorgänge.

Bei *einphasig* durchströmten, flüssigkeitstransportierenden Rohrleitungen kann die maximal auftretende Druckhöhe mit Hilfe der klassischen Joukowsky-Gleichung /HORL92/ abgeschätzt werden. Danach ergibt sich die Druckänderung aus der Dichte ρ des strömenden Fluids, der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit a und der Geschwindigkeitsänderung Δv des strömenden Fluids zu

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v \quad (1.1)$$

In der Praxis sind einphasige Transportvorgänge selbst beim stationären Flüssigkeitstransport von örtlicher Ausgasung begleitet. Diese meist geringen volumetrischen, feinverteilten Gasanteile führen jedoch zu einer erheblichen Minderung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (und damit zur Dämpfung des Druckstoßes gemäß Gl. 1.1), was bei der Berechnung häufig zu konservativer Auslegung führt /RASC97/. Andererseits können genau diese Ausgasungsvorgänge bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten durch Ansammlungen im Bereich von Hochpunkten zu Rohrbrüchen führen /KOTT92/. Für Auslegungszwecke genügt häufig jedoch eine einphasige Betrachtung, bei der die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit a gesondert berechnet werden muss.

In *zweiphasig* durchströmten Systemen (z. B. Entlastungsleitungen an Druckbehältern) sind die Verhältnisse durch das Vorliegen einer kompressiblen Phase wesentlich komplexer. Die

Amplitude der Druckwellen kann hierbei je nach Entstehungsursache größer oder kleiner als im einphasigen inkompressiblen System sein. Erhebliche Wissenslücken bestehen derzeit in der Beschreibung der *druckwellenbedingten Dampfkavitation*. Hierbei fallen die in der Druckminderungswelle aufgrund einer Dampfdruckunterschreitung gebildeten Dampfblasen schlagartig wieder in sich zusammen, wenn die Druckminderungswelle, an Armaturen oder toten Enden als Druckerhöhungswelle reflektiert, in die Rohrleitung zurückläuft, woraus unter Umständen besonders starke Druckstöße resultieren, die den Maximalwert bei einphasiger Strömung erheblich übersteigen können.

Ein mit der Ausbreitung von Druckwellen eng verknüpfter Vorgang ist die schnelle Druckentlastung von Behältern über Sicherheitsarmaturen, bei denen Gase, Flüssigkeiten oder Flüssigkeits/Dampfgemische mit hoher Beschleunigung in luftgefüllte Rohrleitungen einströmen. Aufgrund der großen Druckdifferenzen zwischen Druckreservoir und Entlastungsleitung sind die Fluidbeschleunigungen und -geschwindigkeiten hier besonders hoch, woraus sehr hohe Druckwellenamplituden resultieren, die auch bei Vorliegen einer *kompressiblen Gasströmung* zu erheblichen Rohrleitungslasten aufgrund von oszillierenden Druckwellen führen. Zusätzlich kann es hierbei zur Ausbildung von Flüssigkeitspfropfen kommen, die an Umlenkstellen oder Armaturen unzulässig hohe Impulskräfte ausüben.

Das *Ziel* dieser Arbeit ist die experimentelle und theoretische Beschreibung der oben beschriebenen Druckstoßphänomene in ein- und zweiphasigen Strömungen und deren Auswirkungen auf die Rohrleitungen und die Rohrleitungslager. Hierzu sollen experimentelle Untersuchungen mit unterschiedlichen Stoffsystemen im Technikumsmaßstab durchgeführt und die erhaltenen Ergebnisse mit den Vorhersagen von am Markt verfügbaren kommerziellen Rechenprogrammen zur Beschreibung transients Vorgänge in Rohrleitungen mit kompressiblen und inkompressiblen Medien verglichen werden. Dabei sind Programme mit unterschiedlicher theoretischer Modellierungstiefe zu prüfen. Auf eigene Softwareentwicklungen soll zugunsten der Implementierung von verbesserten Modellen in die Berechnungsprogramme verzichtet werden.

Im einzelnen sind die folgenden Aufgabenstellungen zu untersuchen:

- Untersuchung von Kavitationserscheinungen im Zusammenhang mit dem Schließen bzw. dem Öffnen von Stell- und Regelarmaturen unterschiedlichen Typs,
- Einströmen kompressibler und inkompressibler Medien in leere und teilgefüllte Rohrleitungen bei unterschiedlichen Antriebsdrücken bis 40 bar,
- Ermittlung dynamischer Lagerlasten und Kraftwirkungen im Rohrleitungssystem (Lager/Halterung/Rohrleitung) beim Auftreten von Druckstößen und oszillierenden Strömungen (Gas/Flüssigkeitspfropfen),
- Vergleich kommerzieller Rechencodes zur Vorausberechnung transients Strömungsvorgänge in Rohrleitungen und Armaturen,
- Nachrechnung spezieller Probleme im Bereich der Behälterentlastung unter Verwendung geeigneter Modelle zur Beschreibung zweiphasiger Ausströmvorgänge.

Bei Vorliegen entsprechender experimenteller Daten in Verbindung mit der Möglichkeit einer validierten theoretischen Vorhersage soll hierdurch die sicherheitstechnische und wirtschaftliche Dimensionierung und Bewertung von Rohrleitungssystemen verbessert werden.

2 Stand des Wissens

In diesem Abschnitt werden zunächst die bekannten Modelle der axialen Druckwellenausbreitung in einer axial unbeweglichen, elastischen Rohrleitung beschrieben. Die Leitung wird dabei von einer unterkühlten Flüssigkeit zunächst stationär durchströmt und erfährt eine schnelle Änderung der Strömungsgeschwindigkeit (vgl. Kap. 1). Anschließend wird die Erweiterung der Berechnungsmodelle auf eine Flüssigkeitsströmung mit dispers verteilten, kleinen volumetrischen Luftanteilen behandelt. Es werden einige vereinfachende Annahmen (z.B. starres Leitungsmaterial, Lagerverhalten der Leitung) diskutiert.

Es folgt die Darstellung von einigen speziellen, die Druckwellenausbreitung in unterkühlten Flüssigkeiten beeinflussenden Phänomene:

- Die Auswirkung der hydrodynamisch induzierten Rohrbewegung auf den Rohrrinnendruck (sog. Fluid-Struktur-Wechselwirkungen „FSI“),
- der Einfluß eines hohen stationären Druckgefälles z.B. in langen Transportleitungen (sog. „Line-Packing-Effekt“) und
- die druckerhöhende Wirkung großer Gasblasen an Hochpunkten von flüssigkeitstransportierenden Rohrleitungen.

Kap. 2.2 befaßt sich mit der Beschreibung und Modellierung der durch instationäre Strömungsvorgänge induzierten Kavitations- und Kondensationsvorgänge in Rohrleitungen. Die Rechenmodelle der in dieser Arbeit eingesetzten Rechenprogramme werden abschließend unter den zuvor beschriebenen Wissensstand erläutert und bewertet.

Abgesehen von der Darstellung der Berechnung zur Druckwellenausbreitung, die in dieser vergleichenden Form in der Literatur nicht zu finden sind, wird in diesem Kapitel auf ausführliche mathematische Ableitungen zugunsten des grundlegenden Verständnisses der o.g. Phänomene verzichtet.

2.1 Ausbreitung von Druckwellen in Rohrleitungen

Die strömungsmechanischen Grundlagen für diese Arbeit sind u.a. in Prandtl und Oswajewitsch /PRAN90/ enthalten. Ein besonderer Schwerpunkt auf instationäre Vorgänge in technischen, flüssigkeitsfördernden Rohrleitungssysteme legen Horlacher /HORL92/ sowie Wylie und Streeter /WYLI93/. Anschauliches Material zum Verständnis der Entstehung und Ausbreitung von Druckwellen in offenen Gerinnen und Rohrleitungen findet man bei Kottmann /KOTT92/ und Thorley /THOR90/. Die Vielzahl unterschiedlicher Randbedingungen und daraus resultierender Phänomene läßt eine Klassifizierung nach Branchen sinnvoll erscheinen (BHRA73 - 96).

Druckverlustbeiwerte für Armaturen und Rohrleitungsbauteile findet man in Miller /MILL90/ und Idelchik /IDEL89/. Für hydrodynamische Berechnungen relevante Pumpenkennfelder unterschiedlicher Pumpentypen sind in neuerer Zeit von Thorley et al. /THOR96/ zusammengestellt worden.

Für thermohydraulische Berechnungen von Druckstößen und Kondensationsschlägen in Flüssigkeiten und Flüssigkeits/Dampf-Gemischen bei höheren Temperaturen, die nicht Gegenstand dieser Arbeit sind, sei an dieser Stelle exemplarisch Moody /MOOD90/ angeführt.

2.1.1 Instationäre Flüssigkeitsströmung in Rohrleitungen

Eindimensionale instationäre Flüssigkeitsströmungen in Rohrleitungen werden derzeit von den meisten kommerziellen Berechnungsprogrammen mit dem Charakteristikenverfahren simuliert. In diesem Abschnitt werden die bekannten Hauptbilanzgleichungen kurz vorgestellt.

Die *Impulsbilanz* für die Flüssigkeit einer einphasigen Rohrströmung bei einer plötzlichen Änderung der Strömungsgeschwindigkeit lautet (Horlacher /HORL92/):

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \frac{dz}{dx} + \frac{\zeta}{2 \cdot d} \cdot v \cdot |v| = 0 \quad (2.1)$$

Entsprechend erhält man für die *Massenbilanz*

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho \cdot a^2} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.2)$$

Mit den Definitionen

$$\xi = v + a \cdot t \quad \text{bzw.} \quad \eta = v - a \cdot t \quad (2.3)$$

werden Linien (*Charakteristiken*) definiert, entlang denen sich Störungen (Druckwellen, Geschwindigkeitsänderungen) in der Orts-Zeit-Ebene ausbreiten. Unter der Vereinfachung, daß die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit klein gegenüber der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit ist, erhält man

$$\frac{dv}{dt} \pm \frac{1}{\rho \cdot a} \frac{dp}{dt} + g \frac{dz}{dx} + \zeta \frac{v \cdot |v|}{2 \cdot d} = 0 \quad (2.4)$$

die beiden Grundgleichungen zur Lösung transienter Strömungsvorgänge von Flüssigkeiten ohne Phasenübergang (HORL92/).

Eine einfache Abschätzung der Druckzunahme bei einem Armaturenschnellschluß ist die Berechnung des Druckstoßes nach Joukowsky /JOUK97/. Sie beschreibt die Druckänderung in flüssigkeitstransportierenden Rohrleitungen, die sehr schnell abgesperrt werden. Nach Joukowsky ist die Druckzunahme Δp proportional zur Änderung der stationären Fließgeschwindigkeit v_0 , zur axialen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle a und zur Dichte ρ des Fluids:

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v \quad (2.5)$$

Die in dieser Arbeit untersuchten Softwareprogramme nutzen Gl. 2.5 zur Vorhersage von Druckspitzen, die durch Kavitationsschläge auftreten (vgl. Kap. 2.2 und 2.3).

Wie aus den Beziehungen Gln. 2.4 und 2.5 zu erkennen ist, stellt die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit a neben der Fluidichte ρ , dem Rohrlängendurchmesser d und der Fluidgeschwindigkeit v die entscheidende Einflußgröße für die Vorhersage des Leitungssinnendrucks dar. Für Strömungen newtonscher Flüssigkeiten mit dispergiertem Gas und geringem volumetrischen Gasanteil (0 - 5 Vol.-%) wird daher die folgende Modellierung vorgestellt.

2.1.2 Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit in ein- und zweiphasigen Rohrströmungen

Eine wesentliche Eingangsgröße für viele kommerzielle Berechnungsprogramme ist die Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit, deren Einflußgrößen in diesem Abschnitt zum besseren Verständnis anhand von bereits bekannten Ableitungen erläutert werden.

Schallgeschwindigkeit

Zur Herleitung der Schallgeschwindigkeit in einem starren Rohr wird eine Druckwelle in einem Rohr betrachtet, die sich mit der konstanten Geschwindigkeit c innerhalb eines kompressiblen Fluids fortpflanzt, das sich mit der Geschwindigkeit v_0 fortbewegt (s. Abb. 2.1).

Durch isentrope Kompression erhält der Teil des Fluids, über den die Druckwelle gestrichen ist, eine Geschwindigkeit $v_1 = v_0 + dv$. Betrachtet man nun ein Volumenelement mit der konstanten Querschnittsfläche A , das sich über das Übergangsgebiet der Druckwelle erstreckt, so läßt sich folgende mathematische Ableitung vornehmen.

Durch das Vorrücken der Wellenfront wird das Medium in einer Zeiteinheit auf der Länge $c \cdot dt$ von ρ_0 auf den Wert $\rho_1 = \rho_0 + d\rho$ verdichtet.

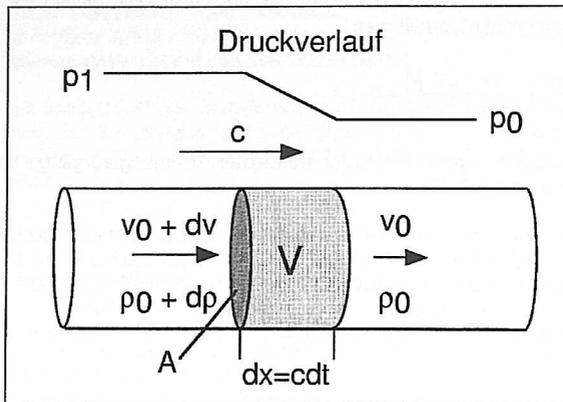


Abb. 2.1: Ausbreitung einer Druckwelle im starren Rohr

Die Massenänderung in diesem Bereich erhält man durch eine Bilanz

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{ab} - \dot{m}_{zu} \quad (2.6)$$

Mit

$$\rho_1 = \rho_0 + d\rho \text{ und } v_1 = v_0 + dv \quad (2.7)$$

erhält man

$$dm = A \cdot c \cdot dt \cdot (\rho_1 - \rho_0) = A \cdot c \cdot dt \cdot d\rho. \quad (2.8)$$

Für die Masse, die in das Verdichtungsgebiet zufließt, gilt

$$\dot{m}_{zu} - \dot{m}_{ab} = A \cdot \rho_1 \cdot (v_1 - v_0) = A \cdot \rho_1 \cdot dv. \quad (2.9)$$

Die Massenerhaltung ergibt dann

$$\frac{dm}{dt} = A \cdot c \cdot d\rho = -A \cdot \rho_1 \cdot dv \quad (2.10)$$

bzw.

$$\rho_1 = -c \cdot \frac{d\rho}{dv}. \quad (2.11)$$

Für das Kräftegleichgewicht am Volumenelement (s. Abb. 2.1) gilt

$$-\frac{dp}{dx} dV = \rho_1 \frac{dv}{dt} dV = \rho_1 \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + c \frac{\partial v}{\partial x} \right) dV \quad (2.12)$$

In dieser Beziehung ist der Ausdruck dv/dt die totale Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit. Die Änderung der Geschwindigkeit mit der Zeit $\partial v/\partial t$ ist Null, da innerhalb des Volumenelementes keine Beschleunigung auftritt und die Trägheitskraft nur durch die Fortpflanzung der Welle und die Bewegung des Volumenelementes bestimmt wird [PRAN90]. Es gilt

$$-\frac{dp}{dx} = \rho_1 \cdot c \cdot \frac{dv}{dx} \quad (2.13)$$

Durch das Einsetzen ρ_1 aus Gleichung 2.11 erhält man

$$-\frac{dp}{dx} = -c^2 \cdot \frac{d\rho}{dv} \frac{dv}{dx} \quad (2.14)$$

und für die Schallgeschwindigkeit den Ausdruck

$$c^2 = \frac{dp}{d\rho}. \quad (2.15)$$

Die Schallgeschwindigkeit ist also die Ausbreitungsgeschwindigkeit kleiner Druckstörungen in idealen Fluiden.

Mit E_f als Elastizitätsmodul der Flüssigkeit gilt dann

$$E_F = \rho_0 \frac{dp}{d\rho} \quad (2.16)$$

und nach dem Einsetzen in Gl. 2.15

$$c^2 = \frac{E_F}{\rho_0} \quad (2.17)$$

Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in einem elastischen Rohr

In einem realen Rohr muß die radiale Erweiterung des Rohrleitungsquerschnitts durch die Druckwelle mit berücksichtigt werden.

Die Ringspannung σ_R in der Rohrwand einer axial beweglichen Leitung mit einem Innendurchmesser d , einer Wanddicke s und einer Innendruckbelastung p ergibt sich nach der Kesselformel:

$$\sigma_R = \frac{p \cdot d}{2 \cdot s} \quad (2.18)$$

Die Ringdehnung ϵ_R ist abhängig vom Elastizitätsmodul des Rohrwerkstoffes E_M und beträgt für eine Druckänderung dp

$$\epsilon_R = \frac{dr}{r} = \frac{1}{E_M} d\sigma_R \quad (2.19)$$

bzw.

$$\epsilon_R = \frac{d}{2 \cdot s \cdot E_M} dp \quad (2.20)$$

Die Kontinuitätsgleichung (Gl. 2.2) beinhaltet den folgenden Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Wellenausbreitungsgeschwindigkeit/HORL92/:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{1}{c^2} + \frac{\rho}{A} \cdot \frac{dA}{dp} \quad (2.21)$$

Der rechte Term der Gleichung läßt sich mit Hilfe von Gl. 2.16 umformen zu

$$\frac{\rho}{A} \frac{dA}{dp} = \frac{\rho}{dp} \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{E_M} \frac{d \cdot dp}{2 \cdot s} \right) = \frac{\rho \cdot d}{E_M \cdot s} \quad (2.22)$$

Für die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit einer Druckwelle in einer Rohrleitung aus elastischem Material erhält man mit Gl. 2.17

$$\frac{1}{a^2} = \left(\frac{1}{c^2} + \frac{\rho \cdot d}{E_M \cdot s} \right) = \frac{\rho}{E_F} + \frac{\rho \cdot d}{E_M \cdot s} \quad (2.23)$$

bzw.

$$a^2 = \frac{1}{\frac{\rho}{E_F} + \frac{\rho \cdot d}{E_M \cdot s}} \quad (2.24)$$

Umgeformt erhält man eine Beziehung zwischen der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und der Schallgeschwindigkeit:

$$a = \sqrt{\frac{\frac{E_F}{\rho}}{1 + \frac{E_F \cdot d}{E_M \cdot s}}} = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{E_F \cdot d}{E_M \cdot s}}} \quad (2.24a)$$

Läßt sich die Rohrleitung durch Festpunkte in Längsrichtung nicht verschieben, so erhält man für dünnwandige Rohre ($d/s > 25$) mit der Querkontraktionszahl $\mu = 0,3$

$$a = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{E_F \cdot d}{E_M \cdot s} (1 - \mu^2)}} \quad (2.25)$$

Für andere Befestigungsweisen dünnwandiger Rohre wird der Ausdruck $1 - \mu^2$ ($= 0,91$ für Stahl) nach Wylie und Streeter [WYL193] durch eine der folgenden Beziehungen ersetzt:

- $1 - 0,5 \mu$ für eine einseitig geführte Leitung
- 1 für den Einbaufall mit Rohrbögen

Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in einer Zweiphasenströmung mit kleinen Druckänderungen

Durch die Anwesenheit freien Gases in der Flüssigkeit wird nach Zielke [ZIEL85] die Schallgeschwindigkeit im Fluid erheblich reduziert. Schon geringe Anteile gelöster Luft erhöhen die Kompressibilität des Gemisches aus Wasser und Luft, ohne die Gemischdichte merklich zu beeinflussen.

Unter den Voraussetzungen

- das Gas verhält sich ideal,
- der Systemdruck ist niedrig,
- das Gas wird isotherm komprimiert,
- der Gasgehalt ist ≤ 1 Vol.-%,
- das Gas ist in der Flüssigkeit fein dispergiert und
- der Schlupf zwischen Flüssigkeit und Gas wird vernachlässigt,

ist der Einfluß der Rohrwandelastizität vernachlässigbar und man erhält gemäß Wylie und Streeter /WYLI93/ die Beziehung

$$a_{2ph} = \sqrt{\frac{E_{2ph}}{\rho_{2ph}}} \quad (2.26)$$

mit dem Elastizitätsmodul für das Zweiphasengemisch

$$E_{2ph} = \frac{E_F}{1 + \varepsilon_G \left(\frac{E_F}{E_G} - 1 \right)} \quad (2.27)$$

und der Gemischdichte

$$\rho_{2ph} = \rho_G \cdot \varepsilon_G + \rho_F (1 - \varepsilon_G) \quad (2.28)$$

Das Elastizitätsmodul des Gases läßt sich wie folgt bestimmen

$$E_G = \rho_G \frac{dp}{d\rho} = \rho_G \frac{d}{d\rho} (\rho_G \cdot R \cdot T) = \rho_G \cdot R \cdot T \quad (2.29)$$

wobei für die Gaskonstante R von Luft gilt

$$R = 287,22 \frac{J}{kg \cdot K} \quad (2.30)$$

Unter der Voraussetzung einer isothermen Zustandsänderung für ein ideales Gas kann der volumetrische Gasgehalt für den jeweiligen Systemdruck bestimmt werden

$$\varepsilon_{G,0} \cdot p_0 = \varepsilon_G \cdot p \quad (2.31)$$

Perko /PERK85/ erzielt unter der rechnerischen Berücksichtigung der Rohrelastizität die gleichen Aussagen und gibt als Gültigkeitsbereich für den Systemdruck 0,2 bis 2 bar die folgende Beziehung an

$$a_{2ph} = \frac{a}{1 + \varepsilon_G \cdot a^2 \cdot \rho_F \cdot p} \quad (2.32)$$

Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in einer Zweiphasenströmung mit großen Druckänderungen

Treten in Systemen größere Druckunterschiede auf, so muß der Einfluß der Rohrelastizität miteinbezogen werden /WYLI93/, /PERK85/.

Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in Blasenströmungen ist druckabhängig (s. Gl. 2.32). Der Wellenberg breitet sich im Vergleich zum Wellenfuß schneller aus, es kommt zum „Aufsteilen“ der Welle und steilen Druckgradienten, sogenannten *Schockwellen* /PERK85/. Mit der Bezeichnung p_{druck} als Wert für das Druckniveau des Druckpeaks erhält man die folgende Beziehung

$$a_{2ph} = \frac{a}{\sqrt{1 + \frac{\varepsilon_{G,0} \cdot a^2 \cdot \rho_F \cdot p_0}{p_{druck} \cdot p}}} \quad (2.33)$$

Zusammenstellung der verschiedenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten

In Tab. 2.1 sind verschiedene Berechnungsgleichungen für die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit vergleichend gegenübergestellt. Man erkennt, daß man unter dem Annahmenspektrum der ungestörten Wellenausbreitung bis zur Annahme "kleiner Druckänderungen" und "niedriger Systemdrücke" Aussagen über die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit erhält, die bis zu 300 % abweichen. Gemäß der Beziehung (Gl. 2.1) werden diese unterschiedlichen Aussagen in gleicher Weise auf die Berechnung von Druckstößen und Kavitationsschlägen übertragen.

Berechnungsfall	Beziehung	Gl.	Geschwindigkeit
Flüssigkeit, starre Rohrwand, kein Wandeinfluß	$c = \sqrt{\frac{E_F}{\rho}}$	(2.17)	$c = 1450 \text{ m/s}$
Flüssigkeit, elastische Rohrwandung	$a = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{E_F \cdot d}{E_M \cdot s} (1 - \mu^2)}}$	(2.25)	$a = 1250 \text{ m/s}$
Flüssigkeit und Luft, $\varepsilon_G \leq 1 \text{ Vol. } \%$, kleine Druckänderungen	$a_{2ph} = \sqrt{\frac{E_{2ph}}{\rho_{2ph}}}$	(2.26)	$a_{2ph} = 500 \text{ m/s}$
Flüssigkeit und Luft, $\varepsilon_G \leq 1 \text{ Vol. } \%$, große Druckänderungen	$a_{2ph} = \frac{a}{\sqrt{1 + \frac{\varepsilon_{G,0} \cdot a^2 \cdot \rho_F \cdot p_0}{p_{druck} \cdot p}}}$	(2.33)	$a_{2ph} = 925 \text{ m/s}$

Tab. 2.1: Vergleich der Ausbreitungsgeschwindigkeiten; Parameter: $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$; $E_F = 2,06 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$; $d = 0,11 \text{ m}$; $s = 0,003 \text{ m}$; $E_M = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$; $E_G = 4,9 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$; $\varepsilon_{G,0} = 1 \text{ Vol. } \%$; $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 4 \text{ m/s}$; $p = 5,8 \text{ bar}$; $\rho_G = 5,8 \text{ kg/m}^3$; $p_{druck} = 42 \text{ bar}$.

2.1.3 Fluid-Struktur-Wechselwirkungen

Mit Fluid-Struktur-Wechselwirkung wird die Interaktion von Flüssigkeits- und Rohrbewegung bezeichnet (Tijsseling /TIJS90/). Sie ist nach Erath /ERAT98/ relevant, wenn ein Rohrleitungssystem weich gelagert ist oder wenn die Flüssigkeitsmasse einen erheblichen Anteil am Gesamtgewicht der Rohrleitung hat. Drei Beispiele seien an dieser Stelle angeführt:

- Die Versuchsanlage von delft hydraulics (Delft, NL), bei der die Versuchsleitung an Drähten aufgehängt ist (u. a. bei Enkel und Grams /ENKE97/),
- Speisewasserleitungen in konventionellen Kraftwerken (Driessen /DRIES98/),
- das Not- und Nachkühlsystem des Kernkraftwerks Gundremmingen (Erath /ERAT98/).

Die Kopplung („coupling“) von Fluid- und Rohrbewegung erfolgt nach Tijsseling /TIJS90/ über drei Mechanismen:

- friction coupling,
- Poisson coupling und
- junction coupling.

Friction coupling beschreibt die gegenseitige Reibung zwischen der Flüssigkeit und der Wand. Für das Problem der dynamischen Berechnung ist sie von untergeordneter Bedeutung /TIJS90/.

Die *Poisson coupling* stellt eine Beziehung zwischen dem Druck in der Flüssigkeit und der axialen Spannung in der Rohrleitung (s. Abb. 2.2) dar. Wenn die Flüssigkeit mit einer Geschwindigkeit v durch eine Rohrleitung fließt (Bild a) und dann abrupt gestoppt wird, kommt es zu einer Druckerhöhung (Bild b), die mit der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit a durch das Fluid läuft. Die Druckerhöhung wird von einer Aufweitung des Rohres (Bild c) begleitet. Aufgrund dieser Aufweitung verkürzt sich die Rohrleitung hinter der Wellenfront. Dies verursacht seinerseits wieder eine Spannung in axialer Richtung, die sich mit der Schallgeschwindigkeit im Wandungsmaterial a_w durch das Rohr fortbewegt und eine radiale Kontraktion der Wandung bewirkt. Dies führt zu einem sekundären Druckanstieg, der oft als Vorläuferwelle bezeichnet wird, da er sich mit einer um den Faktor 3-4 mal höheren Wellenausbreitungsgeschwindigkeit a_w im Stahlwandungsmaterial ausbreitet.

Die *junction coupling* beschreibt die globale Schwingungsanregung des Rohrleitungssystems, die durch die Impulskraft der Flüssigkeit auf Krümmen, Verzweigungen oder Armaturen verursacht wird. Sie ist nach Enkel und Grams /ENKE98/ die wichtigste Einflußgröße bei der Berechnung von Druckstößen unter den o.g. Bedingungen. Wird die Flüssigkeitsströmung stromabwärts einer Rohrbrücke, die von links nach rechts durchströmt wird (s. Abb. 2.3), schlagartig gebremst, so wird sich der Druckanstieg im *starr*en Rohr mit der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit a fortpflanzen (Bild A). In Wirklichkeit wird die Halterung am rechten Rohrbogen nachgeben, so daß sich die Leitung - wie in Bild B gezeigt - bewegen kann. Dies führt zu einem geminderten Druckanstieg im Bereich des rechten Rohrbogens. Bei der Reflexion der Welle am linken Rohrbogen wird der Druckanstieg durch das Mitgehen der Rohrleitung ebenfalls herabgesetzt.

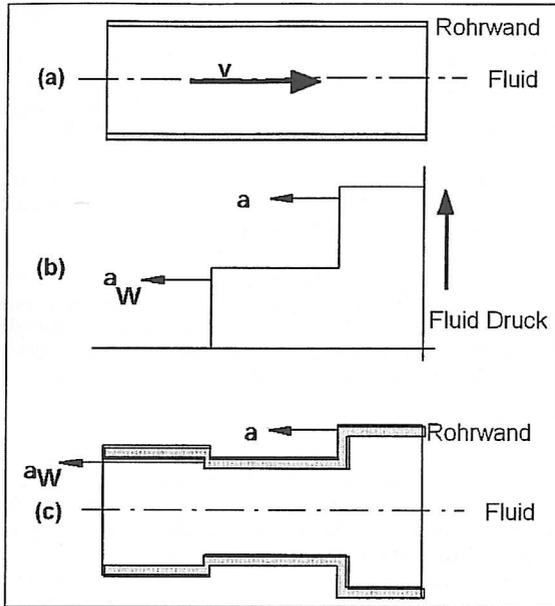


Abb. 2.2: Zur Fluid-Struktur-Wechselwirkungen (*Poisson coupling*)

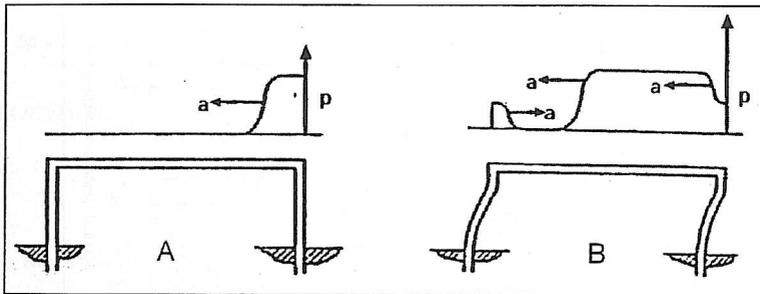


Abb. 2.3: Zur Fluid-Struktur-Wechselwirkung (*junction coupling*)

Häufig führt die Berücksichtigung der FSI zu geringeren Druckanstiegen im Rohr. Dies ist jedoch aufgrund der Eigenschwingungen des jeweiligen Leitungssystems nicht immer der Fall /ENKE97/. Durch die Kopplung von Fluid- und Strukturberechnung wird der Rechenaufwand erheblich erhöht /ERAT98/. In dieser Arbeit wird daher untersucht, inwiefern die Annahme einer starren Rohrleitung zu verfälschten Rechenergebnissen führt bzw. welche Einflußgrößen möglicherweise überwiegen (z. B. der Anteil gelöster Gase).

2.1.4 Line Packing - Flüssigkeitstransportleitungen mit hohem Druckgefälle

In Rohrleitungen mit hohem Druckgefälle (z.B. in langen Transportleitungen, bei der Förderung von Flüssigkeiten mit hoher Viskosität) können durch Absperrvorgänge am Ende der Leitung Druckspitzen auftreten, die wesentlich höher sind als die mit der Beziehung nach Joukowsky (Gl. 2.5) berechneten. Die Situation ist in Abb. 2.4 schematisch dargestellt.

Nach dem Absperrern mit der Armatur am Ende der Pipeline steigt der Druck gemäß der Beziehung 2.5 sprunghaft an (potential surge). Während der Wellenausbreitung stromaufwärts tritt infolge des hohen stationären Druckgefälles folgender Effekt ein:

An der Wellenfront wird die stationäre Strömungsgeschwindigkeit v_0 nicht auf den Wert 0 reduziert, da der stationäre Druck stromaufwärts höher ist. Es strömt also weiterhin Flüssigkeit stromabwärts mit der Restgeschwindigkeit v_{Rest} . Diese Restgeschwindigkeit nimmt mit Fortschreiten der Wellenfront stromaufwärts zu (Krass et al. /KRAS79). Dadurch wird einerseits die Druckhöhe an der Wellenfront verringert gemäß

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot (v_0 - v_{Rest}), \quad (2.34)$$

andererseits nimmt der Druck stromabwärts der Wellenfront immer mehr zu, so daß an der Armatur ein weit höherer Druck anliegt als unmittelbar nach dem Schließen. Die Verminderung des Drucks an der Wellenfront wird als *attenuation*, der Druckanstieg stromabwärts als *line packing* bezeichnet /WYLI93/, /KRAS79/.

In dem in Abb. 2.4 skizzierten Fall wird nach 9 min das Druckmaximum erreicht, bevor die Strömung durch Energiedissipation zum Stillstand kommt.

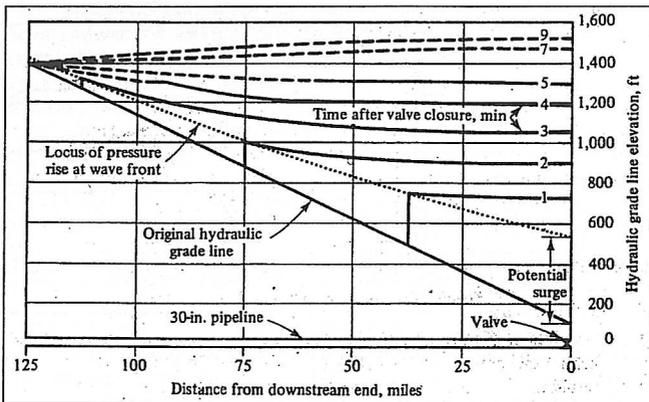


Abb. 2.4: Berechnete Verläufe der Druckhöhe am Absperrventil am Ende einer Pipeline (Länge 200 km, Leitungsdurchmesser 760 mm, stationäre Anfangsgeschwindigkeit: 1,3 m/s, Druckwellengeschwindigkeit 1000 m/s) nach Wylie und Streeter /WYLI93/

2.1.5 Ansammlung von Gasblasen an Leitungshochpunkten

Kottmann /KOTT92/ berichtet von einer lokalen Druckstoßerhöhung im Bereich von Wasserwalzen, die sich hinter großen Luftblasen an Leitungshochpunkten bilden (s. Abb. 2.5).

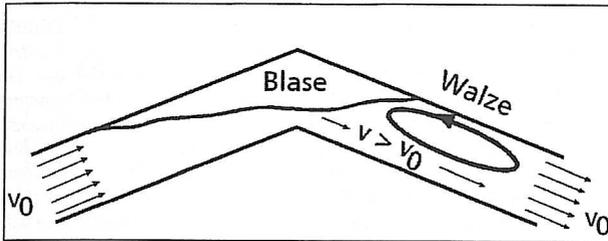


Abb. 2.5: Wasserwalze an einem Hochpunkt

Bei niedrigen Transportgeschwindigkeiten können sich an Hochpunkten durch Ausgasen große Luftblasen bilden. In diesem Bereich wird die Strömungsgeschwindigkeit im Vergleich zur Geschwindigkeit im restlichen Rohr erhöht. Stromabwärts der Luftblase bilden sich Wasserwalzen, da die örtlich erhöhte kinetische Energie der Flüssigkeit wieder dissipiert wird. Erfolgt nun, z.B. durch einen Armaturenschnellschluß, stromabwärts des Hochpunkts ein Druckanstieg, so wird dieser im Bereich der Wasserwalze um das Querschnittsflächenverhältnis von Rohrleitung und Luftblase gemäß

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v \cdot \sqrt{\frac{A}{A - A_{Blase}}} \quad (2.35)$$

erhöht /KOTT92/.

2.2 Kavitationsvorgänge in Rohrleitungen

Unter Kavitation (lat. cavus = hohl) versteht man das Entstehen von Hohlräumen in Flüssigkeiten. Diese Hohlräume können sowohl ein Fremdgas als auch den Dampf der Flüssigkeit enthalten.

In dieser Arbeit ist die Kavitation hinter starken Expansionswellen von Interesse. Diese Expansionswellen, die hohe Zugspannungen in Flüssigkeiten erzeugen können, entstehen z.B. bei der Reflexion von Verdichtungswellen großer Amplitude an freien Flüssigkeitsoberflächen. Hinter starken Expansionswellen bilden sich im allgemeinen sehr schnell Blasengebiete aus. Dieser Vorgang wird in Reintjes /REIN91/ im Unterschied zu anderen Kavitationsvorgängen (z.B. Strömungskavitation an Schiffsschrauben) als *Stoßkavitation* bezeichnet. Diese Bezeichnung soll das schlagartige Auftreten von Blasengebieten hinter starken Expansionswellen charakterisieren. Die Stoßkavitation kann durch die Bildung von Dampf- oder Gasblasen erzeugt

werden. Man spricht dann entsprechend von *Dampf-* oder *Gaskavitation*. Diese Kavitationsformen treten bei transienten Strömungsprozessen in Rohrleitungen auf und werden im folgenden näher beschrieben.

2.2.1 Dampfkavitation

Von Dampfkavitation spricht man, wenn der Druck in der Flüssigkeit auf Dampfdruck fällt und diese somit zu verdampfen beginnt. Es entstehen Dampfblasen, die zu einem Abreißen der Flüssigkeitssäule führen können (Kottmann /KOTT92/). Bei anschließender Druckzunahme kondensieren diese Dampfblasen wieder. Dadurch werden die getrennten Wassersäulen wieder ruckartig vereint, wobei höhere Fließgeschwindigkeiten und somit höhere Druckspitzen als bei der Einphasenströmung auftreten können, die zum Rohrbruch führen können (Gillesen /GILL89/, /KOTT92/). Für das Entstehen der Kavitationszone ist es von entscheidender Bedeutung, ob und in welcher Zahl in der Flüssigkeit *Kavitationskeime* vorhanden sind. Bei der homogenen Nukleation entstehen die Keime in der reinen Flüssigkeitsphase allein aufgrund thermischer Fluktuationen und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Molekülen der Flüssigkeit. Heterogene Nukleation nennt man den Fall, wo äußere Einflüsse wie z.B. Verunreinigungen in der Flüssigkeit, für die Bildung der Keime verantwortlich sind. Flüssigkeiten, in denen wenig Keime vorhanden sind, können kurzzeitig sehr hohe Zugspannungen ertragen ohne aufzureißen.

In technischen Flüssigkeiten, die hier von Interesse sind, sind immer Kavitationskeime in Form von Verunreinigungen, Gasaschen an Fremdteilchen oder als mikroskopisch feine Gasbläschen in der Flüssigkeit vorhanden. Als Folgerung daraus sollte deshalb der Druck in der Flüssigkeit niemals unter den Dampfdruck fallen, da durch das Vorhandensein dieser Kavitationskeime eine sofortige Kavitation einsetzt. In vielen Veröffentlichungen gilt daher das Erreichen des Dampfdruckes als hinreichendes Kriterium für die spontane Entstehung der Stoßkavitation (z.B. Wylie und Streeter /WYLI 93/, Zielke /ZIEL 85/). Dem widersprechen jedoch andere Publikationen, in denen erwähnt wird, daß bei Messungen ein wesentlich niedrigerer Druck als der Dampfdruck notwendig war, um Kavitation zu erzeugen (z.B. Simpson et al. /SIMP 96/).

Simpson et al. /SIMP 96/ stellen eine Versuchsanlage zur Messung von Druckstößen und dem Abreißen der Wassersäule vor (s. Abb. 2.6). Es handelt sich dabei um eine 37,2 m lange Rohrleitung mit einem Innendurchmesser von 22 mm. Sie weist eine Neigung von 5,4 % auf, so daß das eine Ende 2,03 m höher liegt. An beiden Enden befinden sich Druckbehälter, in denen das Wasser auf 4 bar vorverdichtet werden kann. Das Schnellschlußventil kann am Anfang, in der Mitte oder am Ende in die Rohrleitung gesetzt werden.

In Abb. 2.7 sind die Ergebnisse von zwei Messungen aus diesen Versuchen gegenübergestellt. Aufgetragen ist die Haltedruckhöhe über dem Bezugsniveau gegen die Zeit. Abb. 2.7 a zeigt die ansteigende Strömung mit dem Schnellschlußventil am stromabwärts gerichteten Ende der Rohrleitung. Abb. 2.7 b dagegen den umgekehrten Fall einer abfallenden Strömung mit dem Ventil am stromaufwärtigen Anfang der Rohrleitung. Der Vergleich der beiden Messungen zeigt ganz deutlich, daß für das Einsetzen der Kavitation die sog. „Vorgeschichte“ der Flüssigkeit von entscheidender Bedeutung ist.

Im ersten Fall, in dem das Ventil am Ende der Rohrleitung sitzt, muß die Flüssigkeit erst eine deutliche Verdichtungswelle durchlaufen, bevor die Reflexion an der freien Wasseroberfläche eine Unterdruckwelle erzeugt. Die Kavitation setzt nun erst bei einem Druck ein, der *weit unterhalb des Dampfdruckes* liegt. Die Zugfestigkeit der Flüssigkeit im Bereich der Armatur beträgt ca. 260 kPa. Nach einigen Millisekunden steigt der Druck durch das Entstehen der

Dampfphase auf den Dampfdruck. Im zweiten Fall wird die Flüssigkeit gleich von einer Unterdruckwelle durchlaufen und die Kavitation setzt *ohne Unterschreitung des Dampfdruckes* ein.

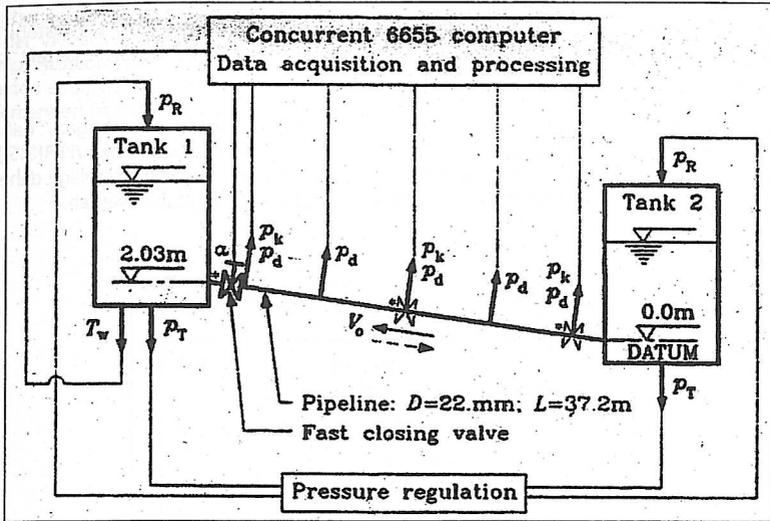


Abb. 2.6: Versuchsanlage zur Messung von Kavitationsschlägen nach /SIMP96/

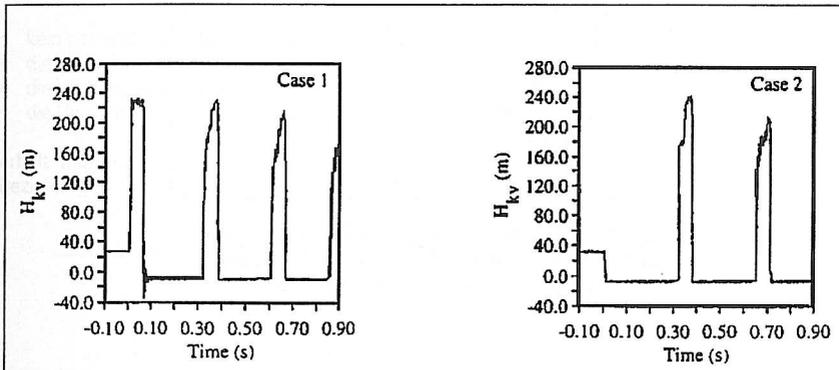


Abb. 2.7: Kavitationsbeginn: Druckhöhe an der Schließarmatur als Funktion der Zeit mit Vorkompression (Case 1) bzw. ohne Vorkompression (Case 2) nach /SIMP96/

2.2.2 Gaskavitation

Betrachtet man nur die Dampfkavitation allein, so erhält man bei der Simulation im allgemeinen zu hohe Druckspitzen. In realen Systemen befinden sich fast immer freie Luftbläschen im Wasser, oder es wird im Wasser gelöste Luft durch Entgasungsprozesse frei. Dieser Vorgang wird als „Gaskavitation“ bezeichnet (Zielke /ZIEL85/).

Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit a wird reduziert (vgl. Abb. 2.8), Druckstöße und Kavitationsschläge werden gedämpft (Suda /SUDA 90/), sofern die Blasen fein verteilt in der Flüssigkeit vorliegen.

Bei der Anwendung der Beziehungen nach Abb. 2.8 ist zu berücksichtigen, daß der Ausgasungsprozeß im Vergleich zum Ausdampfen erheblich länger dauert (Perko /PERK85/). Für Auslegungszwecke sollten die ersten auftretende Druckstöße bzw. Kavitationsschläge daher mit der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit der reinen Flüssigkeit durchgeführt werden.

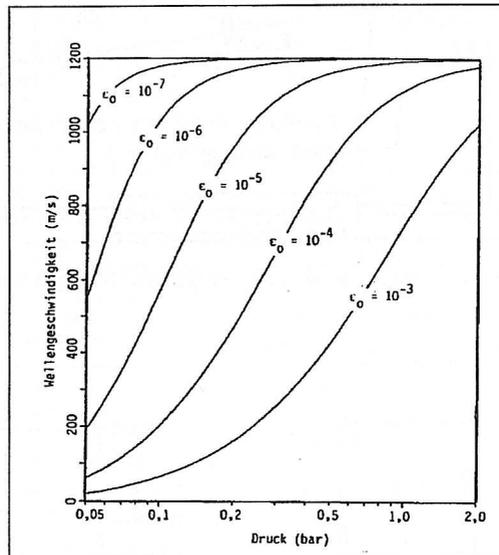


Abb. 2.8: Berechnete Druckwellengeschwindigkeit als Funktion des absoluten Systemdrucks und des volumetrischen freien Gasgehalts (nach Zielke /ZIEL85/)

2.2.3 Modellierung der Kavitationsvorgänge

Dampfkavitation

Die physikalisch exakte Modellierung der o.g. Kavitationsvorgänge ist äußerst aufwendig, da von der Vielzahl der Einflußfaktoren insbesondere die Keimzahl der Nukleationskeime und die Rauigkeitsgeometrie fester Oberflächen nicht bekannt ist. Aus diesem Grund wird das folgende einfache Modell beschrieben, das auch in viele kommerzielle Berechnungsprogramme implementiert ist (vgl. Kap. 2.3).

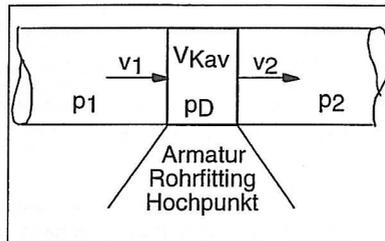


Abb. 2.9: Berücksichtigung von Kavitationsphänomenen

Mit den Voraussetzungen

- kein gelöstes Gas in der Flüssigkeit,
- die Dampfblasen sind ortsfest,
- die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit in der Flüssigkeit ist konstant und
- die Verdampfung und Kondensation erfolgen innerhalb eines Berechnungszeitschrittes

erhält man für die Berechnung des Dampfolumens und des aktuellen Systemdrucks die Beziehungen

$$\frac{dV_{KAV}\{t\}}{dt} = A \cdot (v_1 - v_2) \quad \text{und} \quad (2.36)$$

$$\Delta p = a \cdot \rho \cdot (v_1 - v_2) \cdot \Theta \quad (2.37)$$

mit Θ als Wichtungsfaktor ($\Theta \approx 0,5$). Diese Betrachtung wird nach Horlacher /HORL92/ als *KoDaKav-Modell* bezeichnet. Gl. 2.37 ist im wesentlichen die Joukowsky-Beziehung (Gl. 2.5) des Druckanstiegs zum Zeitpunkt des Zusammenfalls der Kavitationsblase ($V_{KAV} = 0$).

Gaskavitation

Entgasungsphänomene wurden u.a. von /PERK85/ untersucht. Die Versuchsparameter in seiner Arbeit sind denen der in dieser Arbeit durchgeführten Experimente ähnlich und werden daher näher beschrieben. Perko /PERK85/ leitete für die Entgasung von Luft aus Stadtwasser eine empirische Beziehung ab, die gemessene und berechnete Daten mit einem mittleren Fehler von $\pm 30\%$ wiedergibt:

$$\dot{w}_L = 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{c_L - c_{LS}}{c_{LS,0}} \right)^{3,32} \cdot e^{-9,2 \cdot \frac{c_{LS}}{c_L}} \cdot v^{0,86} \quad (2.38)$$

Dabei bedeuten

- \dot{w}_L der Massenzuwachs an freiem Gas pro Volumen und Zeit in $[\text{kg} / \text{m}^3\text{s}]$,
- c_L die Partialdichte der gelösten Luft,
- c_{LS} die aktuelle Sättigungspartialdichte und
- $c_{LS,0}$ die Sättigungspartialdichte bezogen auf Atmosphärendruck, jeweils in $[\text{kg} / \text{m}^3]$,
- v die stationäre Strömungsgeschwindigkeit in $[\text{m} / \text{s}]$.

Der stationäre Endwert der volumenbezogenen freien Gasmasse wird durch die folgende Beziehung ermittelt:

$$w_{\max} = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{c_L - c_{LS}}{c_{LS,0}} \right)^{2,59} \cdot e^{-9,3 \cdot \frac{c_{LS}}{c_L}} \quad (2.39)$$

Hierin ist w_{\max} die Masse an freiem Gas pro Volumen in $[\text{kg} / \text{m}^3]$.

Die Gültigkeitsbereiche für die Beziehungen (2.30) und (2.31) gibt Perko wie folgt an:

Strömungsgeschwindigkeit :	0,7 - 3,3 m/s,
absolute Gasbeladung:	17 - 50 g/m ³ .
Druckabsenkung:	2 bar auf 0,08 bar bis 0,6 bar.

2.3 Modellvergleich der Projektsoftware - transiente Flüssigkeits-, Gas- und Gas/Flüssigkeitsströmung

Die Auswahl der Programme erfolgte unter dem Aspekten des *Verbreitungsgrades* in der chemischen Industrie und im Bereich der Wasserversorgung. Weiterhin sollten die Vorhersagen von Programmen mit unterschiedlicher *Modelltiefe* ermittelt werden.

In dieser Arbeit werden die in folgender Tabelle zusammengestellten Berechnungsprogramme untersucht.

	WANDA	FLUSTRIN	FLOW MASTER	PIPET	SIR-3S	MONA
Version	2.0	2.12	5.2	3.3	5.0	1.10
	12/97	01/97	10/98	08/97	10/97	08/98
System	Windows	DOS-DBOS	Solaris	Windows	Windows	Solaris
Hersteller	delft hydraulics (NL)		Flowmaster (UK)	Sunrise (UK)	3S-Consult (D)	Scand- power (N)
Medien	*	*	*, Gas	*	*	*, Gas, Tropfen
Phasen	eine	eine	eine	eine	eine	drei
Geometrie	verzweigt	unverz. w.	verzweigt	verzweigt	verzweigt	verzweigt
Model- lierung**	**	**	** Energie	**	**	Impuls (2) Konti (3) Energie (2)
Kavitation	Dampf		Dampf	Dampf	Dampf	3-Phasen- Modell
Lösungsver- fahren ***	***	***, FEM	***	***	***, FDM	FDM

*Flüssigkeit, **Impulsgleichung und Kontinuitätsgleichung, ***Charakteristikenverfahren FEM, FDM: Finite Elemente- bzw. Differenzen-Methode

Tab. 2.2: Projekt-Software

Mit Ausnahme des Rechencodes FLUSTRIN werden Strömungszustände eindimensional (in axialer Richtung) berechnet. Diese Methode ist vor allem bei verzweigten Systemen aufgrund der weitaus längeren Rechenzeit bei mehrdimensionaler Betrachtung vorzuziehen.

FLUSTRIN erfaßt den gegenseitigen Einfluß von Rohrleitungsgeometrie, -material und der Druckwellenausbreitung in der Flüssigkeit (sog. *Fluid-Struktur-Wechselwirkung*, FSI). Es werden jedoch nur unverzweigte Systeme mit bis zu 100 Knoten berechnet. Ein erheblicher Nachteil besteht darin, daß Kavitationserscheinungen nicht berücksichtigt werden können (FLUSTRIN Technical Guide /FLUS90/).

WANDA (WANDA Technical Guide /WAND94/), FLOWMASTER (FLOWMASTER Technical Guide /FLOW98/), PIPENET (PIPENET Technical Guide /PIPE96/) und SIR-3S (SIR-3S Handbuch /SIR97/)

sind Rechencodes vergleichbarer Modelltiefe. Die Berechnungsgrundlage der Programme ist das Charakteristikenverfahren, wobei FLOWMASTER und SIR-3S Routinen zur Berücksichtigung kleiner Anteile disperser Gasvolumina in einer Flüssigkeitsströmung implementiert haben. Mit beiden Codes ist es darüber hinaus möglich, kompressible *Gasströmungen* in Rohrleitungen zu berechnen. Hierbei berechnet FLOWMASTER im Gegensatz zu SIR-3S auch instationäre Vorgänge.

Das Programm MONA ist in der Lage, einen dreiphasigen Strömungszustand Gas/Flüssigkeit/Tropfen in Rohren zu berechnen. Die Impuls- und Massenbilanzen für die Flüssigkeit werden für die Gas- und Tropfenphase formuliert. Energiebilanzen für die Gas- und Flüssigkeitsphase vervollständigen zusammen mit empirischen Ansätzen für Reibungseffekte das Dreiphasenmodell. Es können Wärmetransportphänomene und das Auftreten verschiedener Strömungsformen in verzweigten Systemen vorausberechnet werden (Hoyer et al. /HOYE95/).

Analog zu den Bilanzen (s. Gl. 2.1 bzw. 2.2) werden beim Rechencode MONA eine weitere Impulsbilanz für die Gasphase mitsamt Tröpfchen sowie zwei weitere Massenbilanzen für Gas und Tröpfchen erstellt. Bei den beiden Energiebilanzen werden die Tröpfchen und die Flüssigkeitsphase zusammengefaßt. Der Wärme- und Transportaustausch zwischen den beiden Phasen wird erfaßt, ebenso Wärmeübergangphänomene zwischen Wand und Medium. Eine weiterführende Darstellung findet man bei Hoyer et al. /HOYE95/.

Die Zustandsgleichung für das Gas wird beim Rechencode FLOWMASTER das ideale Gasgesetz verwendet. Wärmeeintrag oder -abfuhr an die Umgebung können berücksichtigt werden. Ebenfalls ist die Modellierung unterschiedlicher Zustandsänderungen möglich (Klingebiel et al. /KLING/, /FLOW98/).

FLUSTRIN benutzt drei Strukturgleichungen, um die Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit und Rohr zu erfassen (s. /FLUS90/). Durch eine Druckerhöhung im Fluid wird das Rohr gedehnt, in alle drei Raumrichtungen bewegt, Torsionsspannungen ausgesetzt und in Schwingung versetzt. Daraus können Rückwirkungen auf den Fluiddruck resultieren (Fluid-Struktur-Wechselwirkungen).

Die Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit a wird nach Gl. 2.25 vom Programm-Anwender berechnet und vorgegeben (FLOWMASTER, WANDA, SIR-3S, PIPENET). Somit ist es möglich, kleine Gasgehalte, die die Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit herabsetzen, nach Gl. 2.28 oder Gl. 2.33 zu berechnen. Die Rohrreibung wird im allgemeinen nach Colebrook-White (Miller /MILL90/) bestimmt, obwohl diese Berechnungsmethode streng genommen nur für stationäre Systeme gültig ist.

Kavitationsphänomene werden bei den Programmen, die mit dem Charakteristikenverfahren arbeiten, in der Form des KoDaKav-Modells (vgl. Abschnitt 2.2) berücksichtigt (FLOWMASTER, WANDA, SIR-3S, PIPENET).

3 Beschreibung der experimentellen Untersuchungen

3.1 Beschreibung der Versuchsanlage

Die Druckstoßanlage besteht im wesentlichen aus zwei parallel verlegten Rohrleitungen der Nennweiten DN50 und DN100 (s. Abb. 3.1). 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 Strömungsform einsetzen zu können. Die Verschaltung der Anlagenteile Druckbehälter, Auffangbehälter, Durchlauferhitzer, Kompressor und Kreislumpen ermöglichen die Betriebsweisen

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

In der Darstellung sind zwei Details vergrößert dargestellt - die Schnellschlußarmatur mit anschließendem zwischengeflanschten Leitfähigkeits-Gittersensor (links) und ein Miniaturdruckaufnehmer (rechts). (Tatsächlich erfolgt der Einbau der Druckaufnehmer in den horizontalen Leitungsabschnitten von unten - vgl. Kap. 3.2.1).

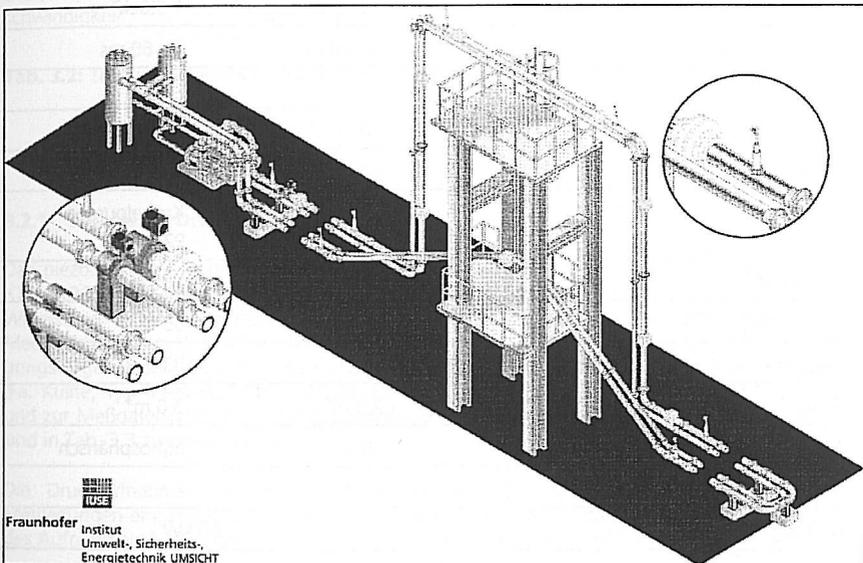


Abb. 3.1: Perspektivische Ansicht der Versuchsanlage (nicht maßstabsgerecht)

Die charakteristischen Daten der Versuchsanlage sind in folgender Tabelle aufgeführt.

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
Schließbarmaturen mit pneumatischem Antrieb		
Exzentrische, metallisch dichtende Absperrklappe	1 Stück	1 Stück
Zentrische, weichdichtende Absperrklappe	-	1 Stück
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		
	Stufenkreislumppe P1	Kreislumppe P2
Durchsatz	50 m ³ /h;	185 m ³ /h
Förderhöhe	140 m	55 m
Behälter		
Inhalt	B1 2,0 m ³	B2 3,0 m ³
Maximaler Innendruck	40 bar	atmosphärisch
Durchlauferhitzer		
Leistung		50 kW
Max. Temperatur		95 °C

Tab. 3.1: Charakteristische Daten der Versuchsanlage

3.2 Beschreibung der transienten Meßtechnik

An der Versuchsanlage wird die in Tabelle 3.2 spezifizierte Meßtechnik zur Vermessung transienter Strömungen eingesetzt.

Meßgröße	Anz.	Beschreibung	Meßfrequenz	Einsatz
Druck	10	piezoresistive Druckaufnehmer inkl. 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-Video-kamera (VHS)	≤ 8 kHz	40 bar
Ventilstellung	4	Hall-Sensor Stellungsrückmeldung	≤ 1 kHz	0 - 90°
Druckwellen- geschwindigkeit	9	Meßstellen zur Laufzeitmessung mit Druckaufnehmern	≤ 20 kHz	0 - 10 km/s

Tab. 3.2: Transiente Meßtechnik in der Versuchsanlage

3.2.1 Transiente Druckmessung

Das piezoresistive Meßprinzip der eingesetzten Druckaufnehmer (Fa. Kulite, Hofheim/Ts, Typ XTM 190M-70) ist in Abb. 3.2 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 großer Übertragungswege in der Versuchsanlage wird das Spannungssignal mit schnellen Meßverstärkern (Fa. Kulite, 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 sind in Tab. 3.3 zusammengestellt.

Die Druckaufnehmer sind in den horizontal verlegten Abschnitten von unten in die Meßleitungen eingebaut (s. Abb. 3.3). Dadurch wird vermieden, daß Luftbläschen in der Nähe des Aufnehmers haften und die Druckspitzen während der Messung dämpfen.

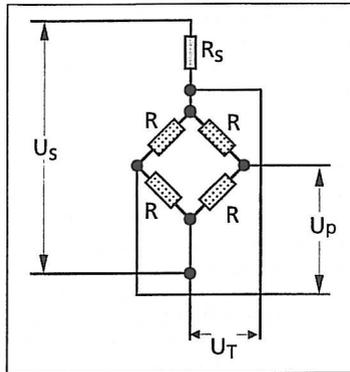


Abb. 3.2: Meßbrücke 5-Leiter- Ausführung

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

Tab. 3.3: Eigenschaften der eingesetzten Miniaturdruckaufnehmer

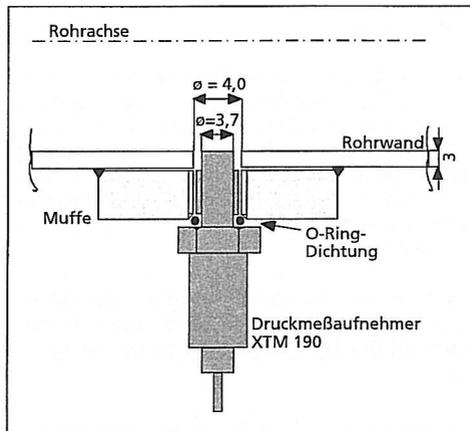


Abb. 3.3: Einbau der Druckaufnehmer in der Versuchsanlage

3.2.2 Transiente Kraftmessung

Das Meßprinzip der dreiachsigen *Kraftaufnehmer* (Fa. Rieger, Rheinmünster, Typ MAK 8000) beruht auf dem der 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 Aufnehmer können an mehreren Positionen in der Anlage als Festpunkt eingebaut werden (s. Abb. 3.4).

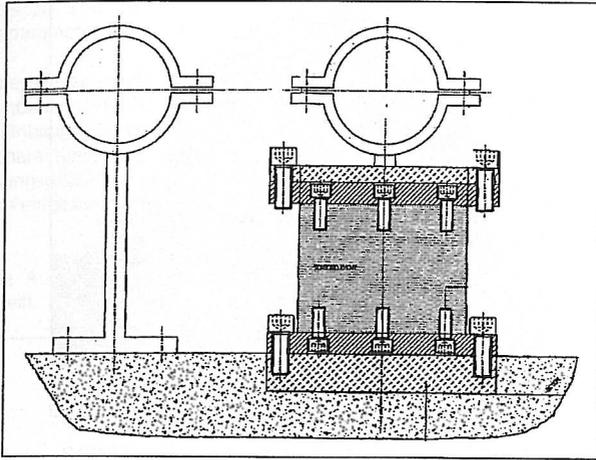


Abb. 3.4: Einbau der triaxialen Kraftaufnehmer in der Versuchsanlage

Die Rohrschellen am Aufnehmer wurden mit zusätzlichen Verstreben versehen, um die Rohrfestigung möglichst starr auszuführen und so die in die Rohrlager eingebrachten Kräfte verlustfrei zu übertragen. Durch axiale Wärmedehnung entstehende Kräfteinträge können kompensiert werden.

3.2.3 Transiente Messung der Phasenanteile

Die vom Forschungszentrum Rossendorf (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 zwei-dimensionale Verteilung der Phasen in einer Gas-Flüssigkeitsströmung zu messen (Prasser et al. /PRAS97/, /PRAS98/).

Bei den Gittersensoren (s. Abb. 3.5) werden in einem Rohrquerschnitt Metalldrähte mit einem Durchmesser von 0,12 mm senkrecht zur Strömungsrichtung eingespannt. Auf einer zweiten

Ebene werden ebenfalls Drähte gespannt. Diese stehen im 90°-Winkel zu der ersten Ebene. Man erhält somit eine Sender- und eine Empfängerebene.

Um eine Messung durchzuführen, werden alle Drähte der Sende-Ebene einzeln und nacheinander mit einer Spannung belegt. Über die Empfängerebene wird an den Kreuzungspunkten der Drähte zeitgleich mit der Anregung die Leitfähigkeit gemessen. Somit wird ein Bild der vorhandenen Strömung erzeugt, wobei die Anzahl der Bildpunkte der Anzahl der Kreuzungspunkte entspricht.

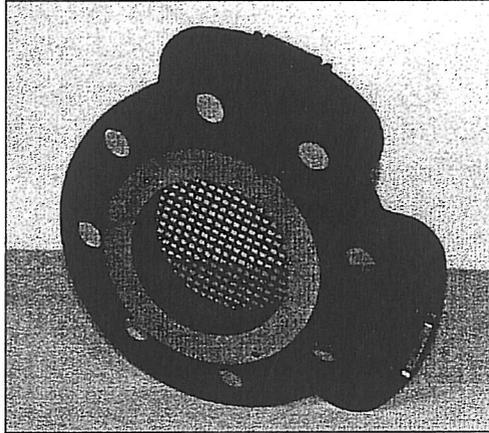


Abb. 3.5: Leitfähigkeits-Gittersensor aus /PRAS98/

Für den Einbau in die Versuchsanlage bei UMSICHT sind die Draht-Ebenen im gespannten Zustand auf doppelt kaschiertes Glasfaser-Leiterkartenmaterial aufgelötet und zwischen zwei Flanschringen mittels Epoxidharzkleber fixiert worden, was die Flexibilität für den Einsatz an verschiedenen Meßpunkten steigert. Damit die Drähte nicht durch die mechanische Belastung im Versuchsbetrieb zerstört werden, wurden diese zusätzlich in ein verstärktes linsenförmiges Profil eingelassen.

3.3 Versuchsdurchführung

3.3.1 Druckstöße und Kavitationsschläge in flüssigkeitsfördernden Rohrleitungen

Eine Kreiselpumpe fördert Flüssigkeit aus einem Vorratsbehälter B2 durch die Versuchsleitungen der Nennweiten DN50 und DN100 im stationären Umlauf (s. Abb. 3.6). Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird die Schließarmatur bei laufender Pumpe geschlossen und nach etwa 10 s wieder geöffnet.

Es werden die auftretenden Druckverläufe über Miniaturdruckaufnehmer (P01-P23) an verschiedenen Meßpositionen aufgenommen und zentral erfaßt. Aus den axialen Abständen der Drucksonden und den Druckspitzen wird die Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit ermittelt. Die in die Festpunkte FP1/2/3 eingeleiteten Kraftspitzen werden ebenfalls registriert. Die Verteilung von Dampf/Luft und Flüssigkeit im Rohrquerschnitt wird mit Gittersensoren /PRAS97/ aufgenommen. Bei kleinen stationären Fließgeschwindigkeiten (< 2,5 m/s) wird das Strömungsprofil stromabwärts der Armatur mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen.

Die untersuchten stationären Strömungsgeschwindigkeiten der Versuchsfluide betragen 0,5 bis 6,0 m/s. Während der Versuche werden Druckspitzen bis 80 bar, Dampfanteile und lokale Kraftspitzen bis zu ± 80 kN in hoher zeitlicher Auflösung von 1 - 10 kHz vermessen. Untersuchungsparameter sind neben der stationären Flüssigkeitsgeschwindigkeit

- der Armaturentyp (zentrische und exzentrische Klappe, Kugelhahn und Stellventil),
- die axiale Einbauposition der Armaturen (Pos.1: 10 m bzw. Pos.2: 186 m hinter der Pumpe)
- die axialen Einbaupositionen der Gittersensoren und Nadelsonden,
- die Schließcharakteristik der Armaturen (Schließzeit, Teilschluß, Ventilkegel)
- die Rohrleitungsgeometrie (mit bzw. Ohne Rohrbrücke, Leitungsdurchmesser) und
- der Anteil an eingespeister Luft in die Flüssigkeitsströmung (Druckstoßdämpfung).

Eine detaillierte Aufstellung aller im Vorhaben durchgeführten Versuche ist in Anhang A2 zusammengestellt.

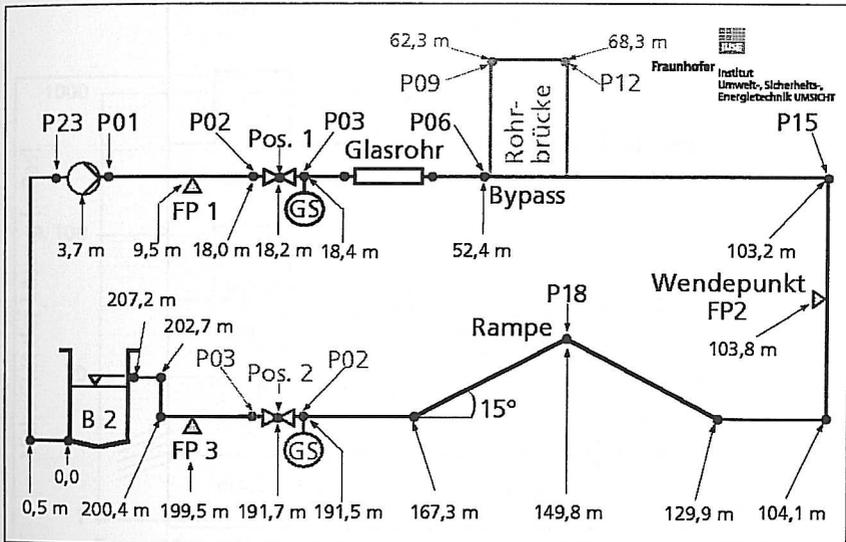


Abb. 3.6: Vereinfachtes R&I-Fließbild der Versuchsanlage für den Versuchsaufbau *Druckstöße* mit charakteristischen axialen Einbau- und Meßpositionen (P01-23: Druckmeßstellen; FP1-3: Kraftmeßstellen; GS: Meßstellen für Gittersensoren; Zahlenwerte *ohne* Rohrbrücke)

3.3.2 Verhinderung von Kavitationsschlägen in flüssigkeitsfördernden Rohrleitungen

Abb. 3.7 zeigt einen Ausschnitt des Versuchsleitungssystems. In der Versuchsleitung DN100 wird an verschiedenen axialen Positionen eine Rückschlagklappe eingebaut, um die Veränderung der auftretenden Kavitationsschläge zu untersuchen. Ziel der Versuche ist es, geeignete Positionen für die Rückschlagklappe zu finden, bei der keine Kavitationsschläge mehr auftreten. Die Versuchsparameter sind

- die stationäre Fluidgeschwindigkeit,
- die axiale Einbauposition der Rückschlagklappe und
- die Rohrleitungsgeometrie (mit Rohrbrücke bzw. horizontaler Bypass).

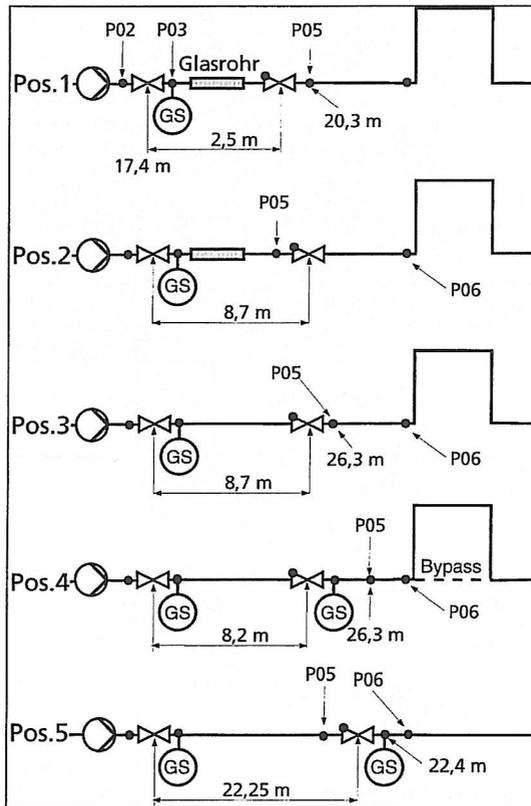


Abb. 3.7: Zur Versuchsdurchführung *Verhinderung von Kavitationsschlägen*

3.3.3 Druckstoßversuche mit höherviskosen Medien

Für die Druckstoßversuche mit höherviskosen Medien wurden Polyethylenglykol-Lösungen unterschiedlicher Konzentration (0 bis 53 Gew.-%) verwendet. Der Viskositätsbereich liegt zwischen 1 und 100 mPas. Dabei zeichnet sich Polyethylenglykol (PEG 3000) durch seine gute Wasserlöslichkeit aus. Weiterhin findet PEG ein weites Anwendungsspektrum in der pharmazeutischen Industrie (Salbengrundlage, Tablettierhilfsstoff), in der Kosmetikindustrie (Zahnpasten, Badeöle), aber auch in der Gummi- und der keramischen Industrie.

Bei dieser Versuchsreihe war eine exzentrische Klappe an Pos. 2 in die Rohrleitung DN50 (s. Abb. 3.6) eingebaut. Die auftretenden Druckverläufe an den Meßpositionen P01 bis P23 sowie die Kräfteinwirkung am Wendepunkt (FP2) (s. Abb. 3.6) wurden gemessen. Zusätzlich wurden bei jedem Versuch aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Viskosität (s. Abb. 3.8) die Temperatur an der Meßposition P07 registriert. Die stationären Strömungsgeschwindigkeiten betragen jeweils 1 - 5 m/s. Lediglich bei den höherviskosen Lösungen (ab 37 Gew.-%) konnte die stationäre Fluidgeschwindigkeit von 5 m/s nicht mehr erreicht werden.

Zur Kontrolle wurde die Viskosität einer Probe aus der Anlage mit Hilfe eines Rotationsviskosimeters (CS 10, Fa. Bohlin) bestimmt und mit erstellten Kalibrierkurven verglichen (s. Abb. 3.8). Die folgenden Herstellerangaben stammen aus /HOEC82/:

- Viskosität der 25% -igen wäßrigen Lösung: 10 mPas bei 20 °C
- Viskosität der 50% -igen wäßrigen Lösung: 80 mPas bei 20 °C

Die Herstellerangaben sind um etwa 10 % niedriger als die Labormesswerte bei 20 °C.

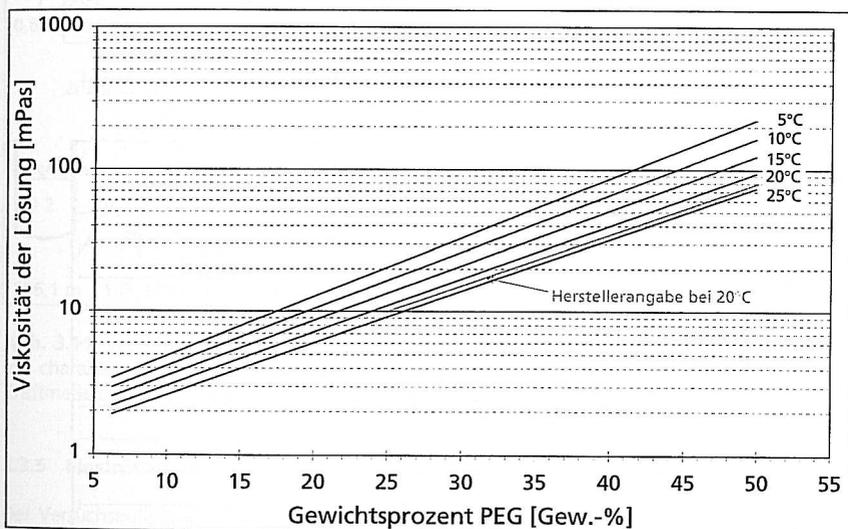


Abb. 3.8: Konzentrationsabhängigkeit der Viskosität von PEG 3000- Lösung bei unterschiedlichen Temperaturen

Der für die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit eingesetzte Wirbelstromdurchflußmesser (Prowirl 70 F/D, Fa. Endress und Hauser) eignete sich im höheren Viskositätsbereich nicht mehr zur Bestimmung des Volumenstromes, da bei höherer Viskosität die Wirbelintensität abnimmt und somit Meßfehler auftreten. Vergleichsmessungen mit einem magnetisch-induktiven Durchflußmesser (MID IFC-80, Fa. Krohne) ergaben, das besonders im unteren Geschwindigkeitsbereich (kleine Reynoldszahlen) größere Abweichungen zum Prowirl auftraten (s. Abb. 3.9). Der Temperaturlaufnehmer von Position P07 wurde für die Versuchsreihe erneut kalibriert (s. Abb. 3.10).

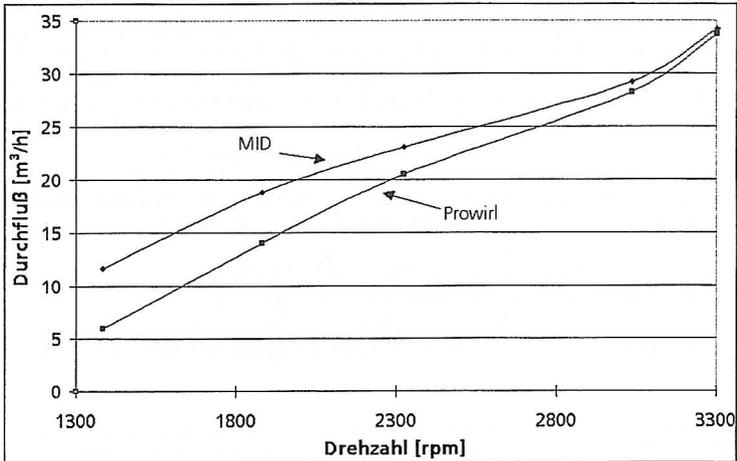


Abb. 3.9: Vergleich zwischen den Durchflußmeßgeräten MID und Prowirl (Temperatur: 14 - 19 °C, Konzentration: 49,8 %, Viskosität: 95 mPas)

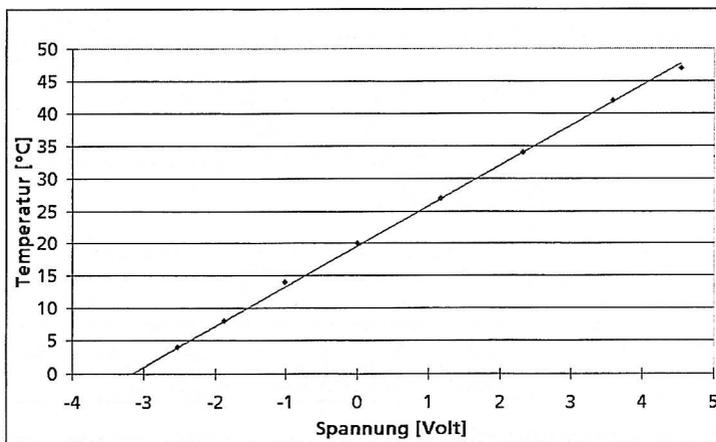


Abb. 3.10: Kalibrierung des Temperaturlaufnehmers T07

3.3.4 Einströmen von Luft in leere und teilgefüllte Rohrleitungen

In Abb. 3.11 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 Wendepunktes (FP2) definierte Volumina Wasser vorgelegt. Beim Öffnen des Kugelhahns strömt Luft durch die Leitung und entspannt in den Auffangbehälter B2. Versuchsparameter sind

- der Anfangsdruck p (5 - 30 bar),
- die Wassermenge V (20 - 65 l) und
- die Rohrgeometrie (Rohrbrücke bzw. Bypass).

Meßtechnisch werden die in Abb. 3.11 eingezeichneten zeitlichen Druckverläufe (P24 - P05), die Reaktionskräfte am Festpunkt FP1 und am Wendepunkt sowie der Phasenanteil von Luft im Rohrleitungsquerschnitt in zeitlicher Auflösung von 1kHz erfaßt. Weiterhin kann die Strömung durch zwei Glasrohre beobachtet werden.

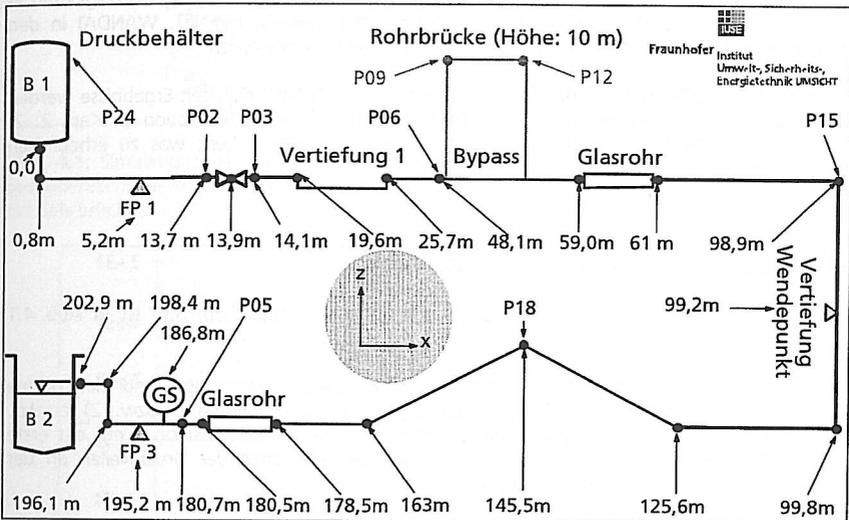


Abb. 3.11: Vereinfachtes R&I-Fließbild der Versuchsanlage für den Versuchsaufbau *Einströmen* mit charakteristischen axialen Einbau- und Meßpositionen. (P01-23: Druckmeßstellen; FP1-3: Kraftmeßstellen; GS: Meßstellen für Gittersensoren; Zahlenwerte *ohne* Rohrbrücke)

3.3.5 Einströmen von Wasser in eine leere Rohrleitung

Der Versuchsaufbau entspricht dem im vorangegangenen Kapitel skizzierten (s. Abb. 3.11). Es wurden jedoch keine Vertiefungen benutzt. Der Behälter B1 wurde mit 780 l Wasser gefüllt. Der Gasraum des Behälters betrug dabei noch 1040 l. Versuchsparameter waren der Vordruck im Behälter (5 - 30 bar) und die Rohrgeometrie (mit bzw. ohne Rohrbrücke).

4 Durchführung von Simulationen

In dieser Arbeit werden Simulationsrechnungen als Vergleichsrechnungen zu den in Kap. 3 beschriebenen experimentellen Szenarien vorgestellt, die mit den Programmen MONA und FLOWMASTER 2 durchgeführt wurden (s. Kap. 6). Mit den weiteren in dieser Arbeit untersuchten Programmen

- SIR-3S (Fa. 3S-Consult, Garbsen b. Hannover),
- PIPENET (Fa. Wölfel Beratende Ingenieure, Höchberg b. Würzburg),
- WANDA (Fa. Delft Hydraulics, Delft (NL)),

werden Ergebnisse zu den in Kap. 3.3.1 und 3.3.3 beschriebenen experimentellen Untersuchungen (Druckstöße und Kavitationsschläge in flüssigkeitsfördernden Rohrleitungen) erzielt, die mit den Vorhersagen des Programms FLOWMASTER2 übereinstimmen.

Die in Kap. 3.3.4 dargestellten Experimente zum Einströmen von Gasen und Flüssigkeiten in gasgefüllte Rohrleitungen können von den Programmen (SIR-3S, PIPENET, WANDA) in den vorliegenden Programmversionen (vgl. Kap. 2.3) nicht berechnet werden.

Die mit dem Programm FLUSTRIN (Fa. Delft Hydraulics, Delft (NL)) erzielten Ergebnisse werden in dieser Arbeit nicht vorgestellt, da in sämtlichen Versuchen Stoßkavitation (s. Kap. 2. 2) auftritt. In FLUSTRIN ist zur Zeit kein Kavitationsmodell implementiert, was zu erheblichen Abweichungen von Messung und Rechnung führt.

4.1 Simulationsrechnungen mit FLOWMASTER2

Die für das Kapitel 3.3.1 entworfene Simulationsgeometrie (vgl. Abb. 3.6) ist in Abb. 4.1 dargestellt.

Im Unterschied zum tatsächlichen Leitungssystem wurden die Pumpe und der offene Pufferbehälter B2 durch feste Druckrandbedingungen (Komponenten 3 bzw. 2) ersetzt. Dadurch nimmt man in Kauf, daß beim schnellen Schließen an der Position 1 nur der erste Druckpeak genau berechnet werden kann, da die Teilreflexionen der Druckwellen an der Pumpe nicht erfaßt werden können (vgl. Kap. 6).

Die Schließarmatur 1 ist eine Klappe (*butterfly valve Type B* aus /MILL90/) mit der vom Hersteller GESTRA GmbH angegebenen Durchflußcharakteristik (s. Abb. 4.2). Alternativ wurden in Kap. 6.3 die mit einem neuen Verfahren erzielten *dynamischen* Klappencharakteristiken in die Simulationsprogramme eingesetzt. Im Controller 26 wurden die gemessenen Öffnungs-Zeit-Verläufe eingegeben. Die Rohrlängen wurden zum Zwecke der elastischen Berechnung angepaßt, die Gesamtlänge der simulierten Leitung ist ca. 2 m länger als die der Versuchsanlage.

Für die Berechnung des Zeitschritts wurde die gemessene Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von 1220 m/s (DN100) eingesetzt. Die Rohrrauigkeit wurde aus stationären Rechnungen zu 0,03 mm bestimmt. Dies entspricht Literaturangaben für neue, geschweißte Stahlrohrleitungen (z.B. /MILL90/). Aufgrund des natürlichen Gefälles der Anlage wurden die Höhenkoordinaten gemäß Abb. 4.3 eingesetzt. Da Umlenkungen für den zeitlichen Druckverlauf von

untergeordneter Bedeutung sind, wurden die Bögen im Bereich der Pumpe und des Auffangbehälters B2 durch gerade Rohrleitungselemente ersetzt.

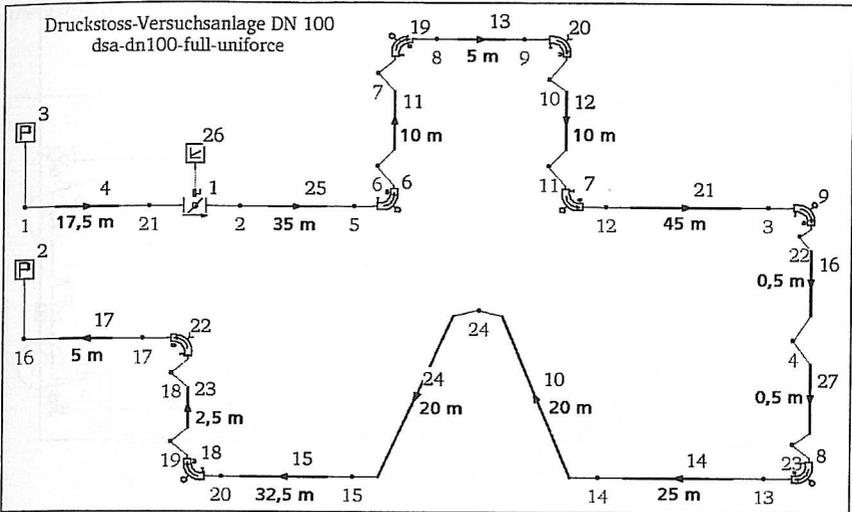


Abb. 4.1: Simulations-Leitungsgeometrie (FLOWMASTER 2) für das Szenario *Druckstöße und Kavitationsschläge in flüssigkeitsfördernden Rohrleitungen* (s. Kap. 3.3.1) - Armatur an Pos. 1; mit Rohrbrücke

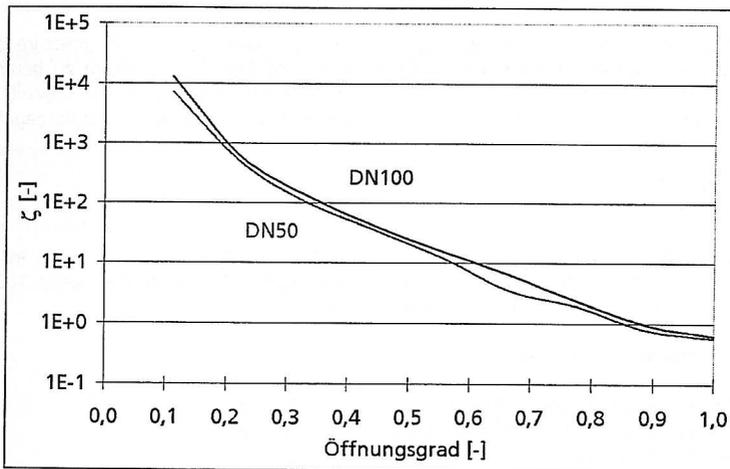


Abb. 4.2: Widerstandsbeiwerte der exzentrischen Klappen DN100/DN50 (Hersteller-Angaben)

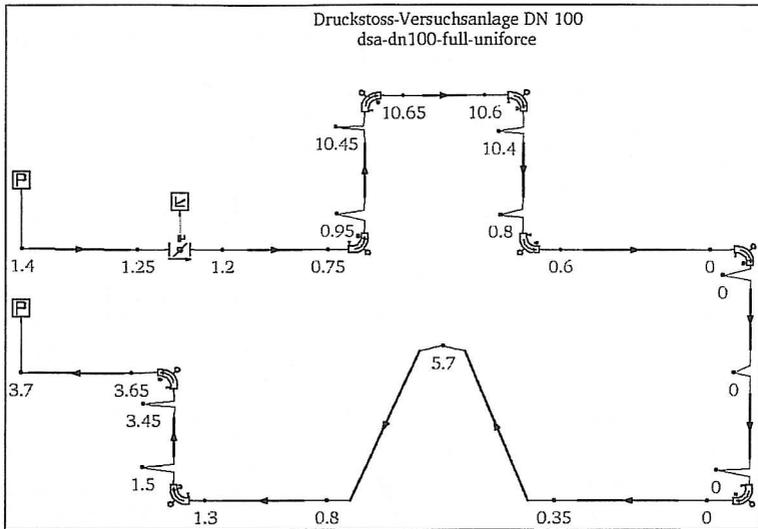


Abb. 4.3: Höhenangaben der Berechnungsknoten

Die Simulation eines instationären Vorgangs erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird in einer stationären Rechnung der Druck an der Druck-Quelle 3 (s. Abb. 4.1) bei vorgegebenem Flüssigkeitsdurchsatz ermittelt (stationäre Druckverlustberchnung des gesamten Systems). Dies erfolgt mit einer Quelle konstanten Durchflusses (sog. *Flow Source /FLOW98/*). Hieraus erhält man den Druck am Knoten 1. Die Armatür ist hierbei vollständig geöffnet.

Im zweiten Schritt ersetzt man die Flow Source durch eine Druckquelle (*Pressure Source /FLOW98/*). Um die Ausbreitung von Druckwellen in einzelnen Rohrleitungen zu berechnen, wird die Zeitschrittweite in Abhängigkeit von der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit a , der Rohrleitungslänge L und der Anzahl der Leitungsabschnitte N_{sec} vom Anwender vorgegeben

$$\Delta t = \frac{L}{N_{\text{sec}} \cdot a} \quad (4.1)$$

Es folgt die transiente Berechnung mit dem errechneten Startdruck. (z.B. wird in dieser Anordnung eine Anfangsdruck von 2,6 bar für die Komponente 3 errechnet, wenn 100 m³/h Wasser durch das System stationär gefördert werden sollen).

Weitere Simulationsdaten sind:

- Wellenausbreitungsgeschwindigkeit DN100: 1220 m/s
- Wellenausbreitungsgeschwindigkeit DN50: 1350 m/s
- Zeitschrittweite DN100: 0,001 s
- Zeitschrittweite DN50: 0,0009 s
- Diskretisierung der Leitungen $L / N_{\text{sec}} = 1,25$ m

4.2 Simulationsrechnungen mit MONA

Die Berechnung mit MONA wird analog zu dem in Kap. 4.1 skizzierten Verfahren durchgeführt. Die Versuchsleitung DN100 ist in MONA gemäß Abb. 4.4 abgebildet.

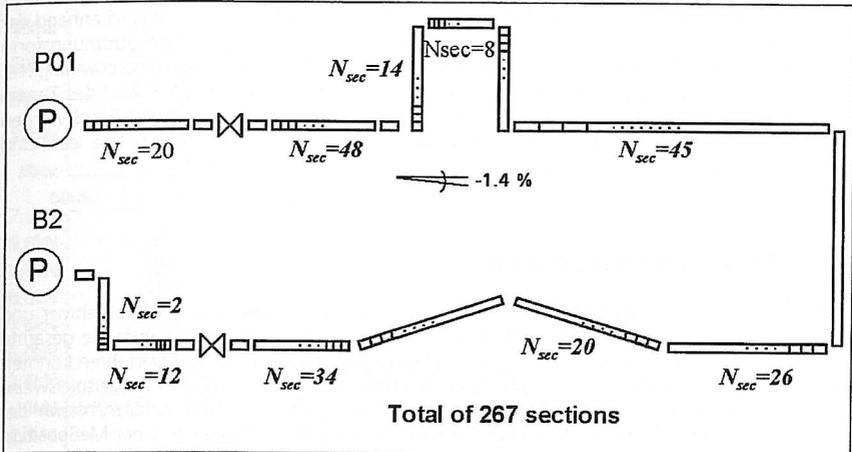


Abb. 4.4: Simulations-Leitungsgeometrie (MONA) für das Szenario Druckstöße und Kavitationsschläge in flüssigkeitsfördernden Rohrleitungen (s. Kap. 3.3.1) - Armatur am Anfang der Versuchsleitung, mit Rohrbrücke

Es werden 267 Berechnungssektionen definiert. Das Höhengefälle der Anlage von 1,4 % wurde berücksichtigt. Weitere Simulationsdaten sind:

- Zeitschrittweite: $\leq 0,0002$ s
- Rohrrauigkeit: $k = 0,01$ mm
- Luftvolumenanteil: 0,1 Vol.-%
- adiabate Zustandsänderung
- kein Druckverlust an Rohrbögen.

5 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

In diesem Kapitel wird zunächst die Leistungsfähigkeit der MSR-Technik diskutiert und deren Einsatzgrenzen aufgezeigt (Kap. 5.1). Im Anschluß erfolgt die Auswertung ausgewählter Versuche zum Armaturenschnellschluß (Kap. 5.2). Das Versuchsleitungssystem wird anhand der eingesetzten Meßtechnik bezüglich der Meßgrößen Druck, Kraft, Phasenanteil, Strömungsform und Zeit analysiert. Weiterhin wird der Einfluß der Parameter Strömungsgeschwindigkeit, Schließzeit, Armaturentyp und Leitungsgeometrie vorgestellt. In Abschnitt 5.3 wird das Thema der Verhinderung von Druckstößen und Kavitationsschäden behandelt. Abschließend werden Ergebnisse zu Einströmvorgängen von Luft (Kap. 5.4) und Wasser (Kap. 5.5) in eine leere und teilgefüllte Rohrleitung vorgestellt.

5.1 Überprüfung des Meßsystems

Das schnelle Messen physikalischer Größen stellt hohe Anforderungen an Meßaufnehmer und -verstärker sowie an die Meßleitungen bis zur Meßdatenerfassung. Daher wurde die gesamte transiente Meßtechnik mehrmals überprüft und kalibriert. Transiente Kalibrierverfahren konnten nicht durchgeführt werden. Jedoch wurden Plausibilitätsprüfungen durchgeführt. Beispielsweise muß an einer Meßposition der Druck genau dann auf Sättigungsdruck abfallen, wenn der Gittersensor Dampf detektiert. Umgekehrt erfolgt beim Kavitationsschlag an einer Meßposition ein Druckanstieg zeitgleich mit dem Kräfteintrag und dem Kollabieren von Dampf. Diese Übereinstimmung war bei allen Versuchen sehr gut gegeben. Auf zwei Abweichungen soll im Abschnitt (Kap. 5.1.2) näher eingegangen werden.

5.1.2 Reproduzierbarkeit der Druck- und Kraftmessung

In Abb. 5 sind vier mit gleichen Versuchsparametern durchgeführte Versuche vergleichend dargestellt. Das obere Bild zeigt den zeitlichen *Druck*verlauf an der Meßstelle P02, das untere den zeitlichen *Axialkraft*verlauf an der Meßstelle FP1. Die Versuche wurden mit der wäßrigen Polyethylenglykol-Lösung (40 Gew.-% PEG3000) in der Versuchsleitung DN50 durchgeführt.

Man erkennt, daß beide Meßgrößen mit hoher Genauigkeit (bis in ein Zeitintervall von 0,01 s) reproduziert worden sind. Der zeitliche Versatz von ca. 3 ms ist durch unterschiedliche Schließzeiten zu erklären.

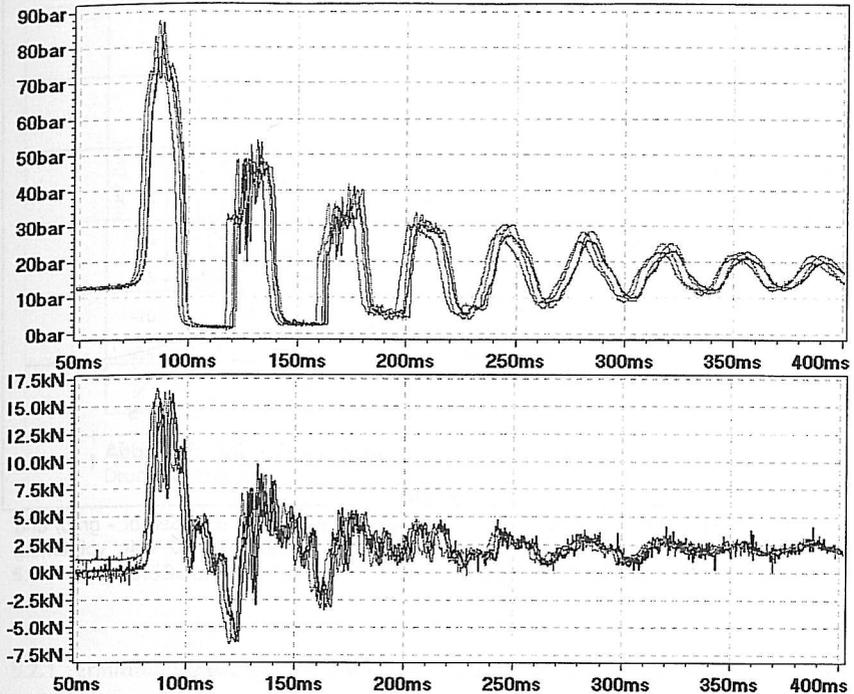


Abb. 5: Reproduzierbarkeit von Druck- (oben) und Kraftsignalen (unten); Versuche 33c39, 33c40, 33c41, 33c42); Versuchsleitung DN50, Wasser / 40 Gew.-% PEG; Meßstellen: Kx1 - Kraft; P02 - Druck

5.1.3 Stellungsrückmeldung der Armaturen

Eine Überprüfung der Stellungsrückmeldung ergab, daß bei sehr kurzen Schließzeiten der Absperrarmaturen die Rückmeldung zeitlich verzögert registriert wurde. Die effektive Schließzeit war bei diesen Versuchen kleiner.

Abb. 5.1 stellt die zeitlichen Verläufe der Armaturenstellung beim Schließvorgang dar. Der Meßaufnehmer liefert das grau dargestellte, oszillierende Spannungssignal (-15 bis 25 mV), welches zur Veranschaulichung auf 2 bis 10 V umgerechnet wurde. Das Signal, welches den Stellungsregler verläßt, ist durch ein im Gehäuse befindlichen Meßverstärker geglättet und auf 4 - 20 mA genormt. Man erkennt, daß das genormte Signal bei Schließzeiten unterhalb von ca. 300 ms nicht für Vergleichssimulationen zu benutzen ist, da eine erheblich längere Schließzeit postuliert wird. Für vergleichende Rechnungen wurde die Stellungsrückmeldung beim schnellen Schließen korrigiert.

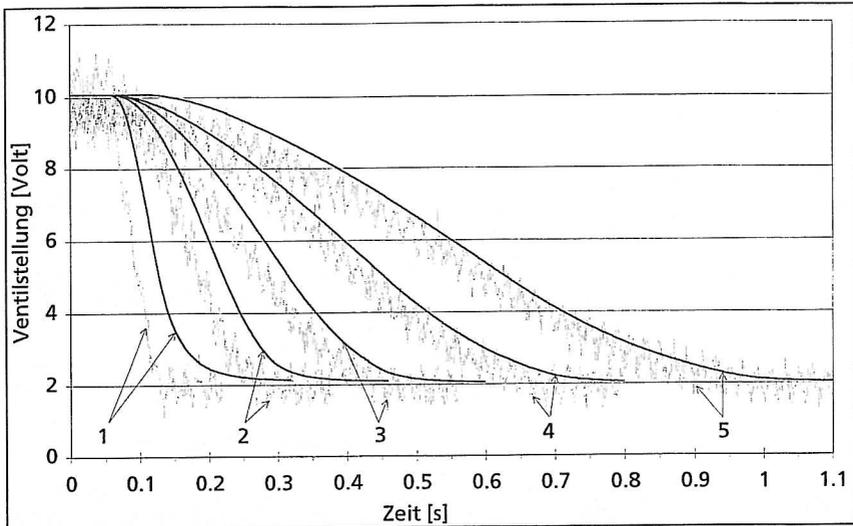


Abb. 5.1: Vergleich der Stellungsrückmeldung von Meßaufnehmer (Hall-Sensor - grau) und Meßverstärker (analoge Stellungsrückmeldung 4-20 mA - schwarz); 10 Volt: vollständig geöffnet, 2 Volt: vollständig geschlossen

5.1.4 Der Einfluß großer Temperatursprünge auf die Druckmessung

Der Halbleiter-DMS, das dehnungsempfindliche Sensorelement der benutzten Druckaufnehmer, besteht aus einem sehr dünnen schmalen Siliziumstäbchen. Unter dem Einfluß mechanischer Spannungen wird die Bandstruktur des Halbleiters verformt. Diese Verformung verändert die elektrische Leitfähigkeit. Man bezeichnet dies als piezoresistiven Effekt /SCH192/.

Der Temperatureinfluß bewirkt eine Widerstandsänderung des Dehnungsmeßstreifens durch die thermische Änderung seines spezifischen elektrischen Widerstands und durch die thermische Längenänderung des Bauteilmaterials und des Dehnungsmeßstreifens. Da die Druck- und Temperaturempfänger der Fa. Kulite jedoch nur über eine Temperaturkompensation bis $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ verfügen, kommt es bei weiterer Abkühlung zu einer thermischen Nullpunktsdrift.

In Abb. 5.2 ist der Druckverlauf eines Aufnehmers dargestellt, der durch den Kontakt mit Trockeneis von Raumtemperatur auf $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ schockweise abgekühlt wurde.

Zu Beginn der Messung wurde das Trockeneis unter den Aufnehmer gehalten. Durch die Abkühlung fällt der gemessene Druck zunächst bis auf -7 bar ab. Aufgrund des schwankenden Anpressdrucks mit der Hand steigt in diesem Zusammenhang der Druck an fällt dann aber wieder in den negativen Bereich. Nach 120 s wurde das Trockeneis entfernt. Deutlich ist zu erkennen, daß wieder eine Angleichung an den Umgebungsdruck stattfindet. Nach ca. 200 s wurde der Aufnehmer zur Bestätigung nochmals abgekühlt. Dieser Effekt ist für das Nachrechnen von Gas-Einstromvorgängen unter hohem Vordruck relevant. Bei adiabatischer Rechnung kühlt die Luft z.B. beim Ausströmen aus dem Druckbehälter B1 bei einem Vordruck von 25 auf ca. $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ab.

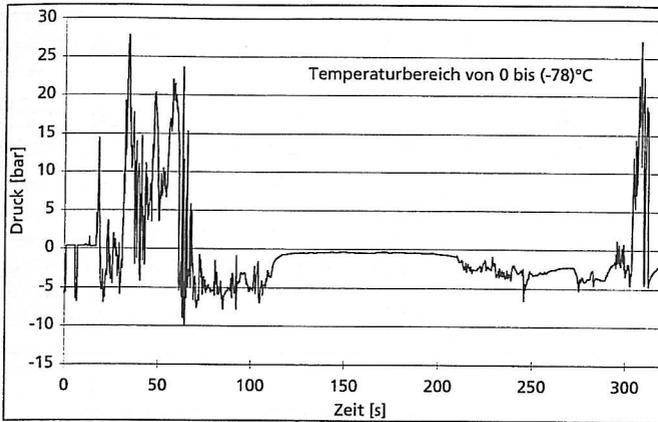


Abb. 5.2: Druck-Zeit-Antwort bei der schnellen Abkühlung eines Druckaufnehmers

5.2 Druckstöße und Kavitationsschläge in flüssigkeitsfördernden Rohrleitungen

5.2.1 Ermittlung der Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit

In Abb. 5.3 ist die Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit a über der stationären Flüssigkeitgeschwindigkeit aufgetragen. Die höchsten Werte (1370 - 1400 m/s) wurden in der Versuchsleitung DN50 ermittelt. Parameter für die Messungen in der Versuchsleitung DN100 sind die Meßpositionen (s. Abb. 3.6), an denen die Laufzeitmessungen durchgeführt wurden. In der oberen Kurve (1250 - 1280 m/s) wurden Daten aus dem Versuchsszenario mit der exzentrischen Klappe am Anfang der Versuchsleitung und Rohrbrücke aufgetragen (vgl. Kap. 3.3.1). Dabei herrscht während des geschlossenen Ventils zwischen den Positionen P12 und P18 annähernd Atmosphärendruck. Wenn das Ventil nach ca. 11 s öffnet, erfolgt ein heftiger Kavitationsschlag, der sich mit der dargestellten Geschwindigkeit von etwa 1260 m/s unabhängig von der stationären Fluidgeschwindigkeit in der Versuchsleitung ausbreitet.

Etwas geringere Werte der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (etwa 1220 m/s) wurden für den Betrieb ohne Rohrbrücke und der exzentrischen Klappe am Ende der Versuchsleitung erhalten (vgl. Kap. 3.6). Hierbei wurde die axiale Ausbreitung des ersten Druckanstiegs beim Ventilschluß (Zeitbereich etwa $t = 0,3$ s) verfolgt. Die tendenziell etwas kleineren Werte deuten auf kleine volumetrische Anteile an disperser Luft im Leitungssystem hin. Die an den Meßpositionen P03 bis P06 aufgenommenen Laufzeiten zeigen mit zunehmender stationärer Flüssigkeitgeschwindigkeit eine deutliche Abnahme der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit. Dies ist dadurch begründet, daß mit zunehmender Flüssigkeitgeschwindigkeit auch das Zeitintervall wächst, in dem stromabwärts der schließenden Armatur Dampfdruck vorliegt (vgl. Kap. 5.2.3, Abb. 5.7). Dadurch kann mehr Luft aus dem Wasser ausgasen, was zu einer Minderung der Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit führt.

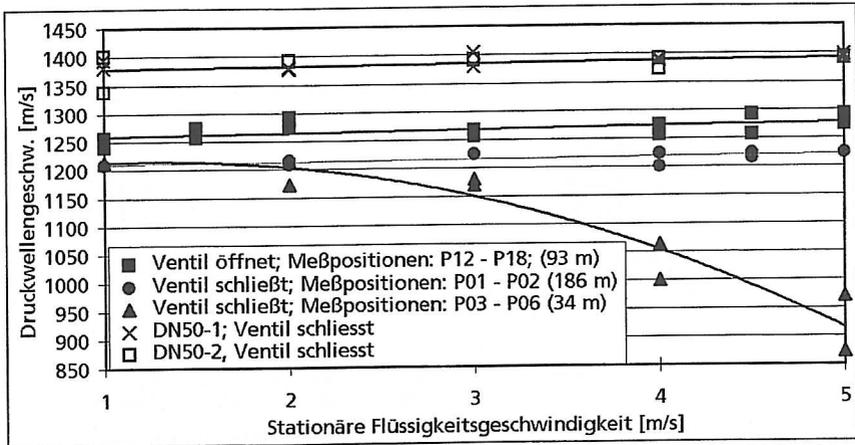


Abb. 5.3: Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Meßposition (Meßpositionen s. Abb. 3.6)

5.2.2 Zeitliche Druckverläufe beim Öffnen und Schließen von Armaturen

Abb. 5.4 zeigt den charakteristischen zeitlichen Verlauf von Stellung und Druck bei dem in Kap. 3.3.1 näher erläuterten Versuchsszenario. Die Armatur wird nach Einstellen eines stationären Strömungszustands schnell geschlossen. Der Druck stromaufwärts der Armatur steigt daraufhin sprunghaft an, oszilliert und verharrt auf dem Niveau der Nullförderhöhe der Pumpe (Bild 1).

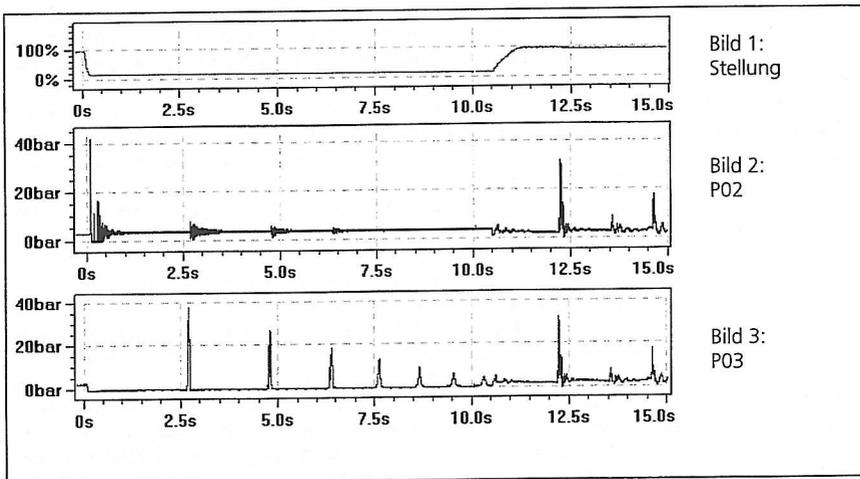


Abb. 5.4: Zeitliche Stellungen- und Druckverläufe vor (P02) und hinter (P03) der Schließarmatur; (Versuch-Nr. 99cbm28, stationäre Strömungsgeschwindigkeit: 3 m/s; exzentrische Klappe; mit Rohrbrücke)

Durch die Undichtigkeit der Armatur werden Druckspitzen aus dem stromabwärtigen Teil der Rohrleitung (P03) in den stromaufwärtigen Teil (P02) übertragen. Nach dem Wiederöffnen der Armatur ist ein weiterer heftiger Druckanstieg zu erkennen (Bilder 2 und 3).

In Abb. 5.5 sind die zeitlichen Druckverläufe aller Meßpositionen für den Versuch 99cbm28 mit einer stationären Flüssigkeitsgeschwindigkeit von 3 m/s dargestellt. Ausgehend von der Störung bei P02 und P03 (Bilder 3 bzw. 4) breiten sich die Druckwellen im Leitungssystem zunächst als Überdruckwelle (stromaufwärts der Armatur, s. P01, P23) und als Unterdruckwelle (stromabwärts der Armatur, s. P03, P06, P09, P12, P18) aus. Man erkennt, daß die Überdruckwelle durch die Kreiselpumpe hindurch läuft und nicht reflektiert wird. Am Hochpunkt der Brücke wird das System durch eine Kavitationsblase hydraulisch geteilt. Erst beim Wiederöffnen der Armatur führt die plötzliche Kondensation auf der Brücke zu einem Druckstoß, der sich im gesamten Leitungssystem ausbreitet.

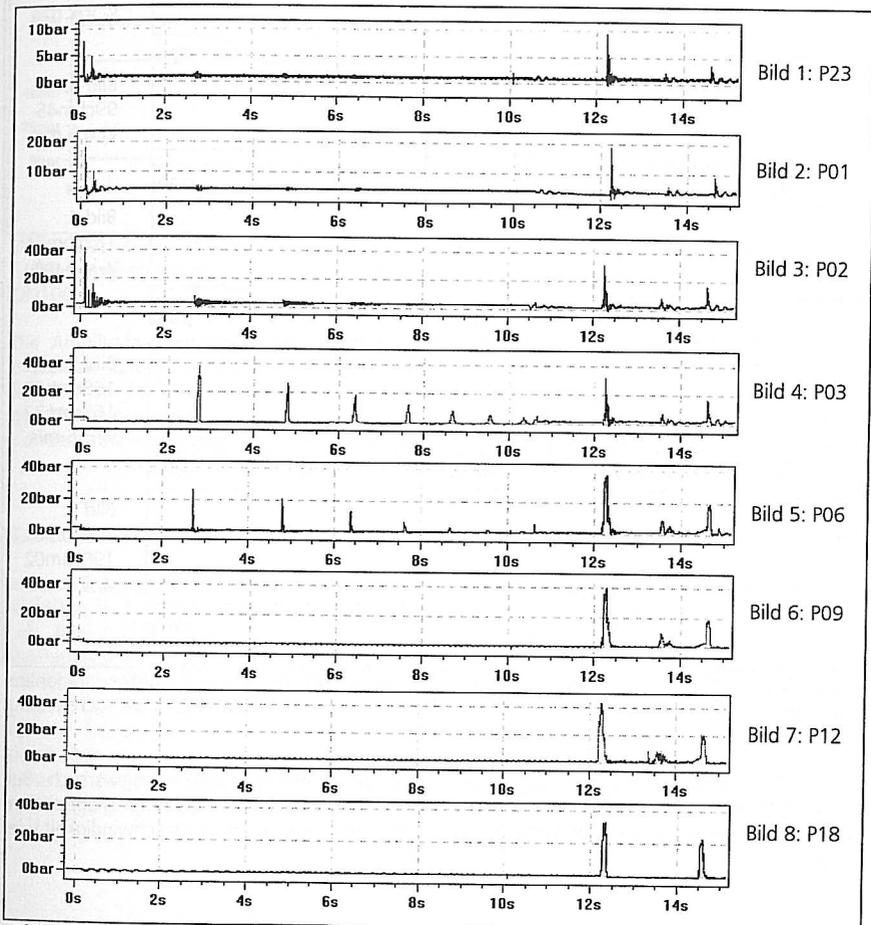


Abb. 5.5: Zeitlicher Druckverlauf an den Meßstellen, Versuch 99cbm28, $v_0 = 3 \text{ m/s}$

5.2.3 Einfluß der stationären Strömungsgeschwindigkeit

Abb. 5.6 zeigt den Einfluß der stationären Strömungsgeschwindigkeit auf die zeitlichen Druckverläufe an der Meßposition P02. Der zeitliche Verlauf der Armaturenstellung ist in Bild 1 dargestellt. Man erkennt, daß die Klappe unabhängig von der stationären Strömungsgeschwindigkeit gleiches Schließverhalten besitzt.

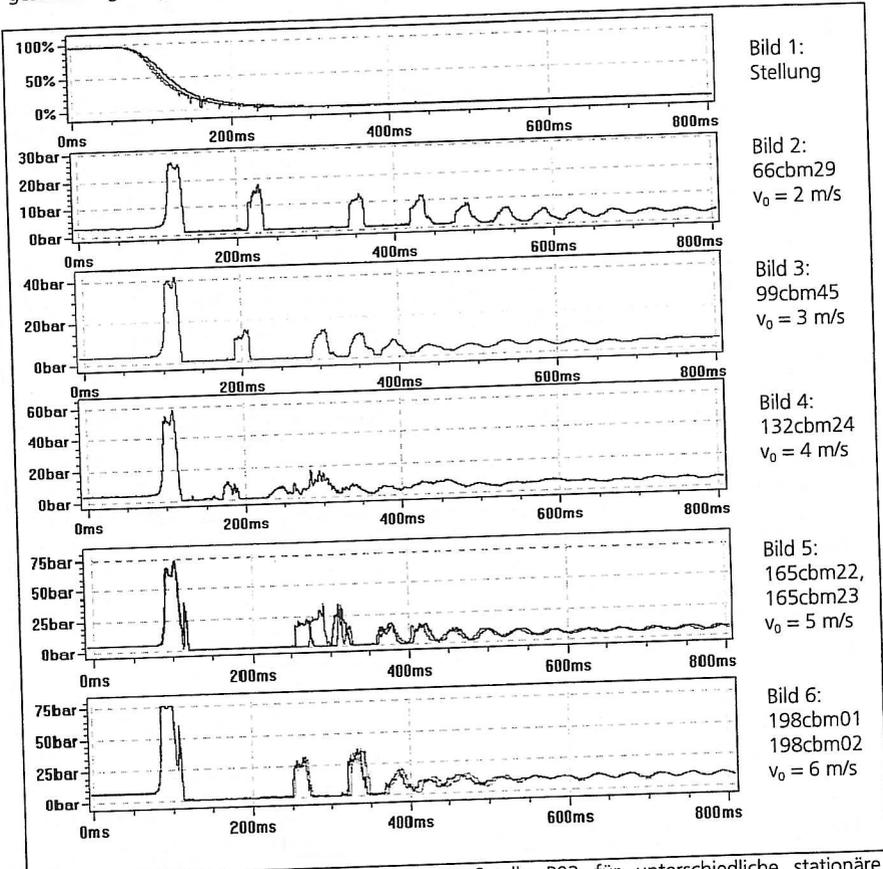


Abb. 5.6: Zeitlicher Druckverlauf an der Meßstelle P02 für unterschiedliche stationäre Strömungsgeschwindigkeiten, Versuche ohne Rohrbrücke, Armatur an Pos. 1; Versuchsleitung DN100

Die Bilder 5 und 6 zeigen den Druckverlauf sowie jeweils einem Wiederholungsversuch. Bei 6 m/s wird der maximale Meßendwert von 76 bar teilweise überschritten. An der Meßposition P03 (stromabwärts der Armatur) wirkt sich die Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit wie folgt aus.

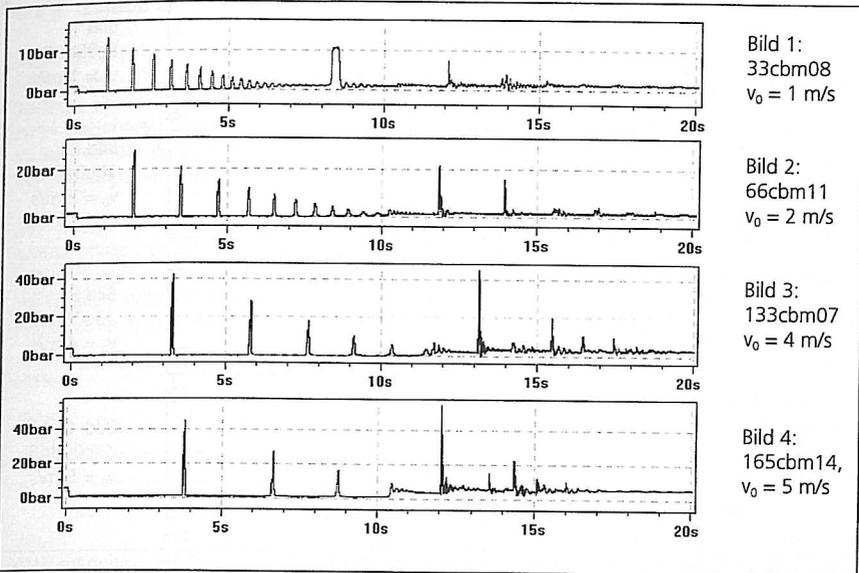


Abb. 5.7: Zeitlicher Druckverlauf an der Meßstelle P03 für unterschiedliche stationäre Strömungsgeschwindigkeiten, Versuche mit Rohrbrücke, Armatur an Pos. 1, Versuchsleitung DN100

Die Amplituden der Druckstöße steigen mit zunehmender stationärer Strömungsgeschwindigkeit an, und die Zeit bis zum Auftreten des ersten Kavitationsschlages nimmt ebenfalls zu. Bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten tritt ein weiterer Effekt auf (s. Bild 1). Trotz geschlossener Armatur wird bei $t = 8,5 \text{ s}$ ein Druckanstieg registriert. Dies ist auf die Kondensation der ersten auf der Brücke gebildeten Dampfblase zurückzuführen.

5.2.4 Einfluß der Leitungsgeometrie - Rohrlitungsdurchmesser

In Abb. 5.8 sind die zeitlichen Druckverläufe für verschiedene stationäre Flüssigkeitgeschwindigkeiten in der Versuchsleitung DN50 dargestellt. Im Vergleich zur Versuchsleitung DN100 (vgl. Abb. 5.7) werden kleinere Amplituden und geringere Zeitintervalle für die auftretenden Kavitationsschläge gemessen. Dies erklärt sich mit den vergleichsweise hohen Reibungsverlusten (der Druckverlust ist proportional zum Verhältnis aus Rohrlänge zu Rohrdurchmesser).

An der Meßposition P02 ergeben sich im Vergleich zum größeren Durchmesser höhere Druckstöße bei gleichen stationären Flüssigkeitgeschwindigkeiten (s. Abb. 5.9). Die liegt an der höheren Wellenausbreitungsgeschwindigkeit aufgrund der höheren Materialsteifigkeit der Versuchsleitung DN50.

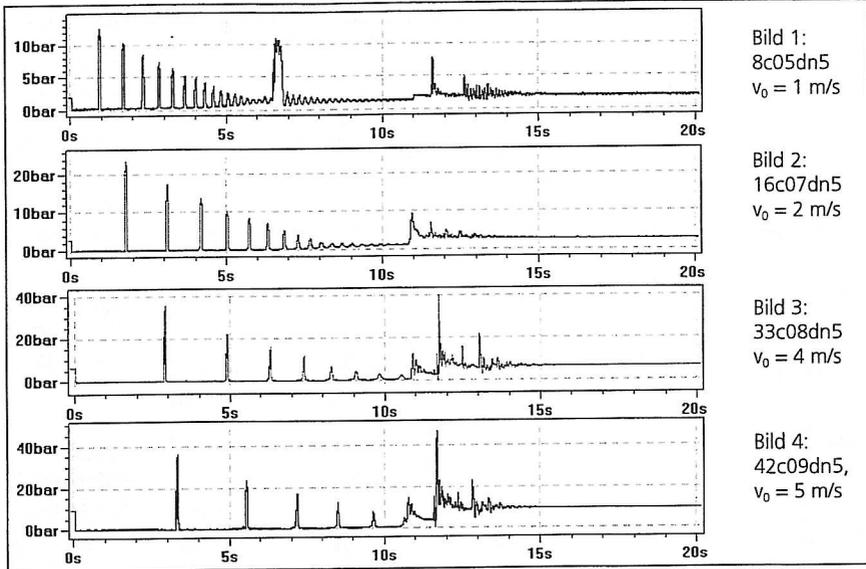


Abb. 5.8: Zeitlicher Druckverlauf an der Meßstelle P03 für unterschiedliche stationäre Strömungsgeschwindigkeiten; Versuche mit Rohrbrücke; Armatur an Pos. 1; Versuchsleitung DN50

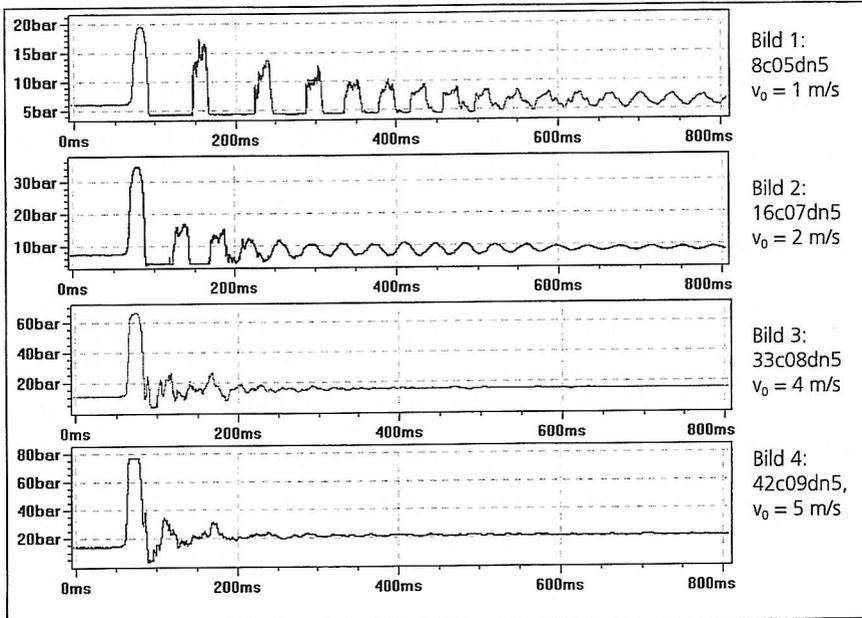


Abb. 5.9: Zeitlicher Druckverlauf an der Meßstelle P02 für unterschiedliche stationäre Strömungsgeschwindigkeiten; Versuche mit Rohrbrücke; Armatur an Pos. 1; Versuchsleitung DN50

5.2.5 Einfluß der Leitungsgeometrie - Versuche ohne Rohrbrücke

Abb. 5.10 zeigt die zeitlichen Druckverläufe an der Meßposition P03 beim Betrieb ohne Rohrbrücke. Die Zeitintervalle, in denen nach dem Armaturenschnellschluß Dampfdruck vorliegt, sind erheblich größer als beim Betrieb mit Rohrbrücke (vgl. Abb. 5.7). So werden bei einer stationären Flüssigkeitsgeschwindigkeit von 4 m/s etwa 10 s benötigt, bis die Dampfblase zusammenfällt (Bild 3). Im Vergleich dazu wird beim Betrieb mit Rohrbrücke etwa 3,2 s zum Blasenkollaps benötigt (vgl. Abb. 5.7, Bild 3).

Der Grund für dieses Phänomen liegt darin, daß sich bei dieser Betriebsweise nur eine großräumige Dampfblase unmittelbar hinter der Armatur bildet. Beim Betrieb mit Rohrbrücke entsteht eine weitere im oberen Bereich der Brücke. Die Wassersäule im senkrechten Leitungsteil zwischen Brückenhochpunkt und Armatur wird durch den hydrostatischen Druck schneller entgegen der ursprünglichen Fließrichtung beschleunigt.

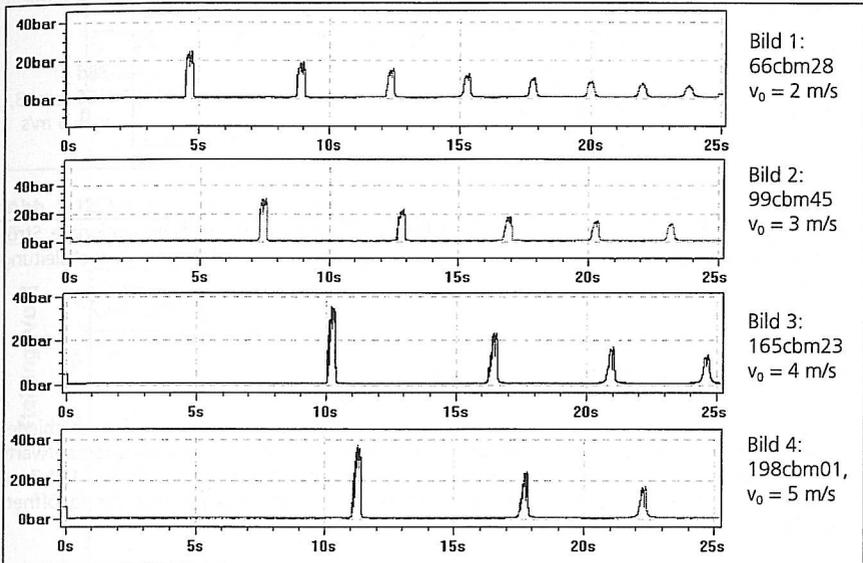


Abb. 5.10: Zeitlicher Druckverlauf an der Meßstelle P03 für unterschiedliche stationäre Strömungsgeschwindigkeiten, Versuche ohne Rohrbrücke, Armatur an Pos. 1, Versuchsleitung DN100

5.2.6 Einfluß der axialen Einbauposition der Absperarmatur

Im Vergleich zur Einbauposition 1 (vgl. Abschnitt 5.2.3, Abb. 5.6) treten die folgenden Unterschiede auf

- die Zeitbereiche mit hohem Druck nach dem Armaturenschnellschluß sind erheblich größer,
- das gleiche gilt für die darauf folgenden Intervalle mit Dampfdruck,
- der Abklingvorgang dauert erheblich länger (ca. 12 s),
- es werden höhere Druckniveaus erreicht.

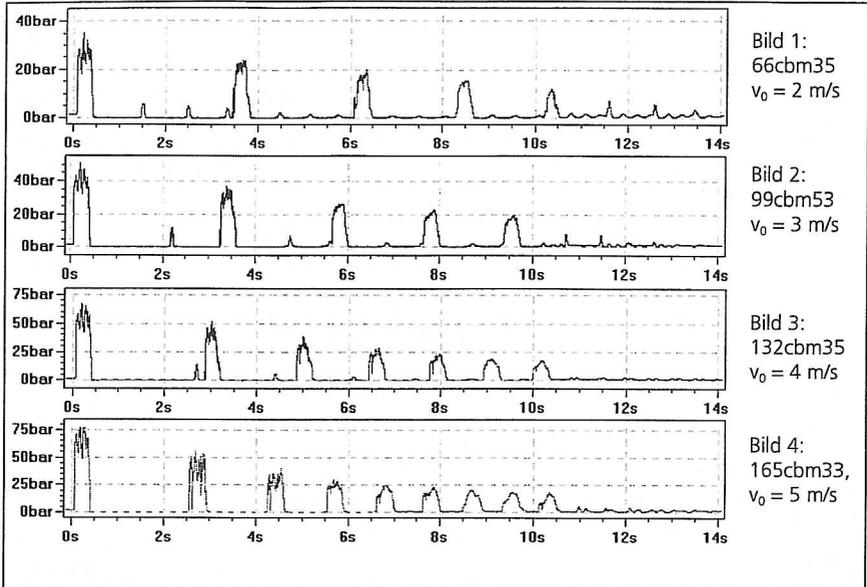


Abb. 5.11: Zeitlicher Druckverlauf an der Meßstelle P02 für unterschiedliche stationäre Strömungsgeschwindigkeiten, Versuche mit Rohrbrücke, Armatur an Pos. 2, Versuchsleitung DN100

5.2.7 Einfluß unterschiedlicher Armaturentypen

In Abb. 5.12 sind die Meßprotokolle der zeitlichen Druck- und Stellungsverläufe für verschiedene Armaturentypen an der hinteren Einbauposition (Pos. 2 in Abb. 3.6) jeweils stromaufwärts der Armaturen (Meßstelle P02) dargestellt. Die axiale Armaturenposition beträgt $x = 191,7 \text{ m}$. Die Stellungsrückmeldungen (linke Skala) stellen den zeitlichen Schließverlauf dar (geöffnet: 10V; geschlossen: 2 V).

Ausgehend von einem stationären Betriebsdruck von etwa 3,5 bar steigen die Druckverläufe beim Schließen steil an. Die exzentrische Klappe verursacht den größten Druckgradienten und mit 65 bar den höchsten Peak. Die Schließcharakteristik des Stellventils (oberer Kurvenverlauf) zeigt, daß infolge des Druckanstiegs vor der Armatur eine im Vergleich zu den Klappen längere Schließzeit benötigt wird ($t = 0,1 - 0,5 \text{ s}$). Durch die Rückstellkräfte der Antriebsfedern wird der Maximaldruck begrenzt (hier auf ca. 40 bar). Die Schließzeit eines Stellventils ist somit abhängig von der Fluidgeschwindigkeit (bei Strömungsstillstand beträgt sie 0,06 s) und von der axialen Einbauposition. Beim Einbau an Pos. 1 werden zum Schließen bei gleichem Flüssigkeitsdurchsatz etwa 0,15 s benötigt (vgl. Abb. 5.12).

Ein weiterer Effekt wird bei Betrachtung der Schließcharakteristik der *exzentrischen Klappe* deutlich. Vergleichend sind hier das Signal der Stellungsrückmeldung (4-20 mA) und das direkt aus dem Hall-Sensor erhaltene Stellungssignal (oszillierende Kurve im Intervall $0 < t < 0,4 \text{ s}$) dargestellt. Das Normsignal ist ein geglättetes, jedoch zeitlich verzögertes Signal, das an die Meßdatenerfassung weitergegeben wird. (vgl. Abschnitt 5.1.2).

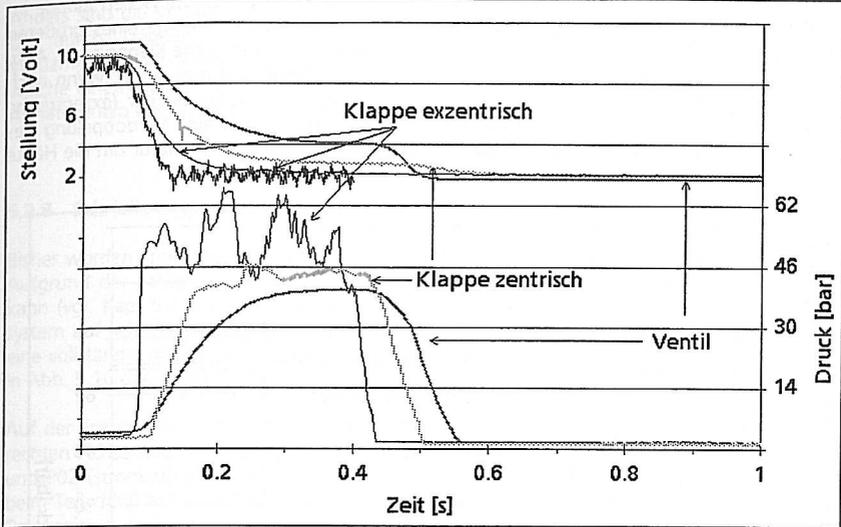


Abb. 5.12: Meßprotokoll von Druck (P02) und Stellung $v_0 = 4$ m/s; Armatur an Pos. 2

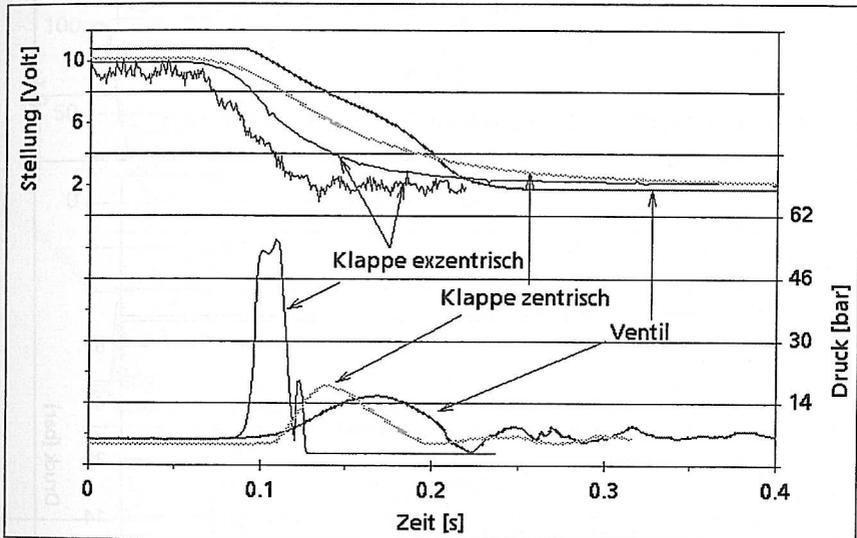


Abb. 5.13: Meßprotokoll Druck und Stellung, $v_0 = 4$ m/s; Armatur an Pos. 1

Im Vergleich zur Einbauposition 2 sind die Auswirkungen der Parameter *Armaturentyp* und *Schließzeit* bei der Einbauposition 1 stärker ausgeprägt (s. Abb. 5.13 und 5.14). Die metallisch dichtende exzentrische Klappe schließt am schnellsten und verursacht mehr als doppelt so große Druckspitzen als die weichdichtende zentrische Klappe, die mit dem gleichen Antrieb

ausgerüstet war. (s. Abb. 5.13). Hierbei liegt das Druckmaximum der exzentrischen Klappe im Bereich des Joukowski - Stoßes /HORL92/. Bei kürzeren Schließzeiten (infolge eines größeren Antriebs mit erhöhtem Drehmoment) steigt der Druckpeak für die zentrische Klappe an (s. Abb. 5.14). Die Schließzeiten von zentrischer und exzentrischer Klappe sind nun gleich, wenn auch um ca. 40 ms verschoben. Bauartbedingt erreicht der Druck kurzzeitig 56 bar (exzentrische Klappe), 46 bar (zentrische Klappe) bzw. 36 bar (Kugelhahn). Durch eine Verdoppelung des Schließzeitintervalls der zentrischen Klappe kann der Druckpeak vor der Armatur um die Hälfte reduziert werden.

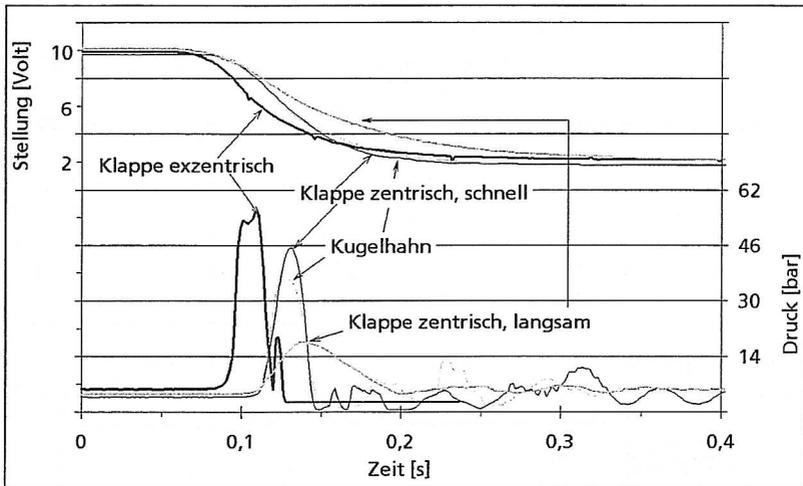


Abb. 5.14: Meßprotokoll Druck und Stellung, $v_0 = 4 \text{ m/s}$; Armatur an Pos. 1

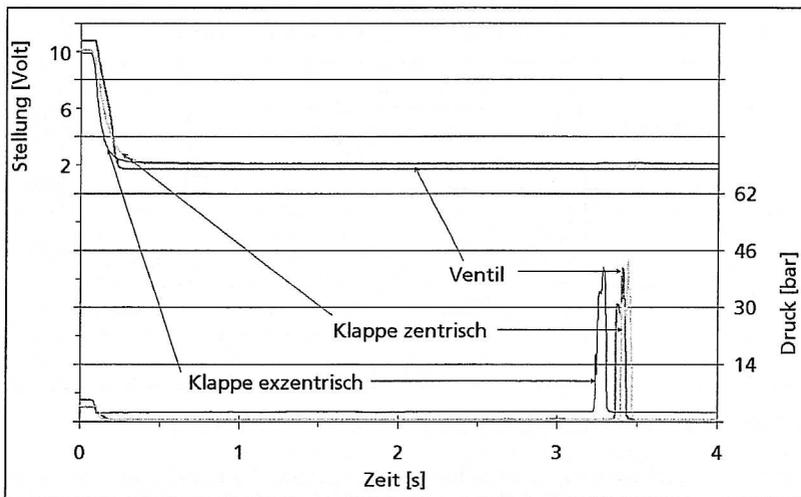


Abb. 5.15: Meßprotokoll Druck und Stellung, $v_0 = 4 \text{ m/s}$; Armatur an Pos. 1

Anders sind die Verhältnisse an der Position P03, stromabwärts der Armaturen (s. Abb.5.15). Die durch Trägheit der strömenden Flüssigkeit erfolgende Druckabsenkung führt zur Verdampfung des Wassers (Kavitation). Bei etwa $t = 3,5$ s kommt es zur Rekondensation, welche einen Kavitationsschlag hervorruft. Die Höhe des Druckpeaks (hier ca. 40 bar) ist vom Armaturentyp und der Armaturencharakteristik im untersuchten Bereich unabhängig.

5.2.8 Schnelle Regelvorgänge (Armaturenteilschluß)

Bisher wurden Ergebnisse zum vollständigen Öffnen und Schließen von Armaturen vorgestellt. Aufgrund der Tatsache, daß ein Druckstoß bei noch teilweise geöffneter Armatur auftreten kann (vgl. Kap. 5.2.7, Abbn. 5.12 bis 5.14), stellte sich die Frage, wie das Versuchssystem auf schnelle Regelvorgänge reagiert. Dazu wurden Versuche durchgeführt, bei denen eine vollständig geöffnete Armatur schnell teilgeschlossen wurde. Die Versuchsergebnisse sind in Abb. 5.16 dargestellt.

Auf der linken Achse sind die zeitlichen Verläufe der Armaturenstellung aufgetragen. Auf der rechten Achse sind die Druckverläufe an den Meßpositionen P03 (stromabwärts der Armatur) und P02 (stromaufwärts der Armatur) aufgetragen. Wie man erkennt, treten bei P02 bereits beim Teilschluß auf ca. 35 % Druckstöße auf (s. Kurve 3). Unterhalb von 20 % erreichen die Druckspitzen den Betrag bei vollständigem Schließen. An der Pos P03 erhält man ebenfalls schon bei Endstellungen ab 33 % meßbare Druckerhöhungen (s. Kurve 3).

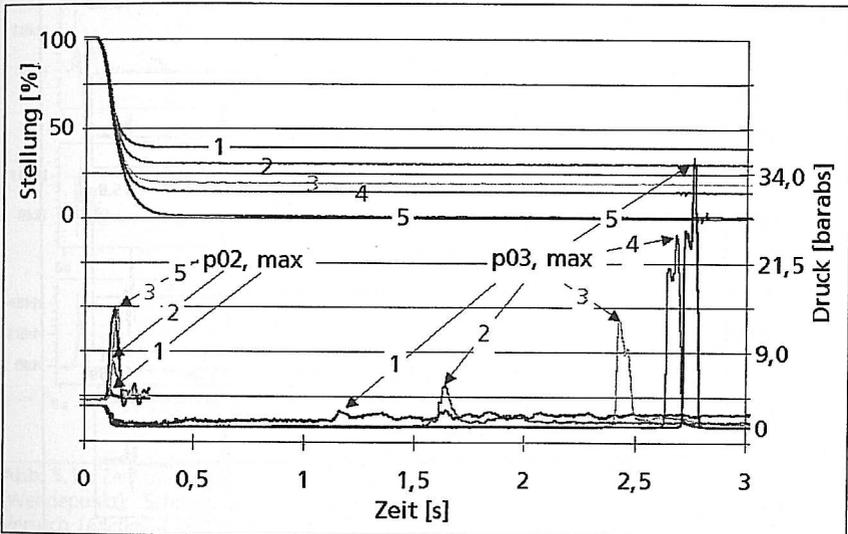


Abb. 5.16: Auswirkungen schneller Regelvorgänge auf den zeitlichen Druckverlauf; Meßstellen: P02 (0 - 0,3 s) und P03 (0 - 3 s); zentrische Klappe an Pos. 1; $v_0 = 3,0$ m/s; mit Rohrbrücke

5.2.9 Krafteintrag in die Festpunkte FP1 und FP2

Abb. 5.17 stellt den zeitlichen Verlauf der in die Festpunkte FP1 (Beginn der Versuchsleitung, Bilder 1 bis 3) und FP2 (Wendepunkt, Bilder 4 bis 6) eingeleiteten Kräfte dar.

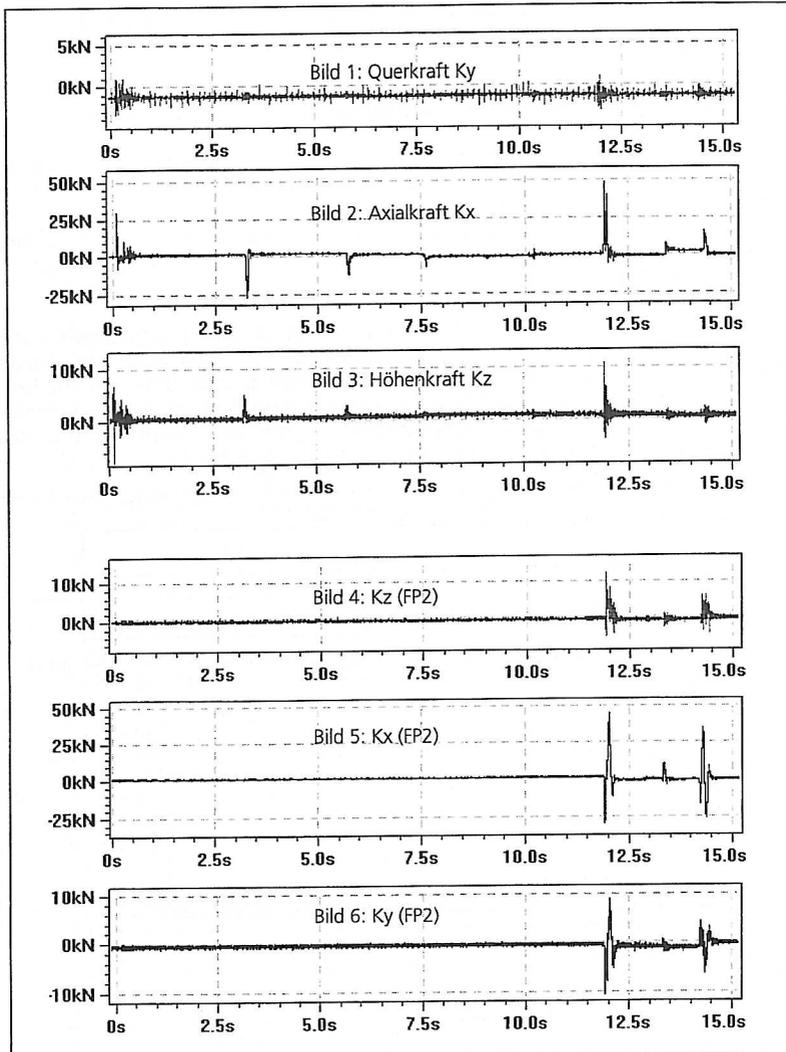


Abb. 5.17: Zeitliche Verläufe der räumlichen Kraftkomponenten an den Meßstellen FP1 (Festpunkt) und FP2 (Wendepunkt), Schnellschluß bei der stationären Strömungsgeschwindigkeit $v_0 = 4 \text{ m/s}$, Versuch 132cbm16, mit Rohrbrücke, Armatur an Pos. 1, Versuchsleitung DN100

In Analogie zu den Druckmessungen (vgl. Abschnitt 5.2.2) werden die durch Druckstöße hervorgerufenen Kräfte in den Festpunkt FP1 eingeleitet. Die größten Kraftbeträge resultieren aus dem Schnellschluß, dem ersten Kavitationsschlag sowie dem Kavitationsschlag nach Wiederöffnen der Armatur (vgl. Bild 2 bei $t = 2, 3$ bzw. 12 s). Auch in Höhenrichtung werden durch Biegung der Rohrleitung Kräfte übertragen, die fast halb so groß sind wie die Axialkräfte. Am Wendepunkt werden zunächst keine Kräfte übertragen (s. Bilder 4 - 6). Durch die Bildung einer Dampfblase auf der Rohrbrücke entsteht dort eine feste Druckrandbedingung (Sättigungsdruck), die das Leitungssystem hydraulisch trennt (vgl. auch /PRAS 98/). Nach Wiederöffnen der Armatur führt der Kavitationsschlag auf der Brücke zu Kraftbeträgen, die durch die Umlenkung der Versuchsleitung am Wendepunkt zu hohen Wechsellasten (Bild 5) von ca. 60 kN führen.

Beim Einbau der Schließarmatur an Pos. 2 (vgl. Abb. 3.6) werden die in Abb. 5.18 dargestellten zeitlichen Kraftverläufe erhalten. Am Wendepunkt (FP2) werden in allen Raumrichtungen erhebliche Kraftspitzen gemessen. Hier ist die Axialkraft mit einer Wechsellast von ca. 100 kN um das 3-4-fache höher als die Quer- bzw. Höhenkraft. Die Axialkraft wird nahezu ungedämpft in den Festpunkt 1 übertragen (Bild 4).

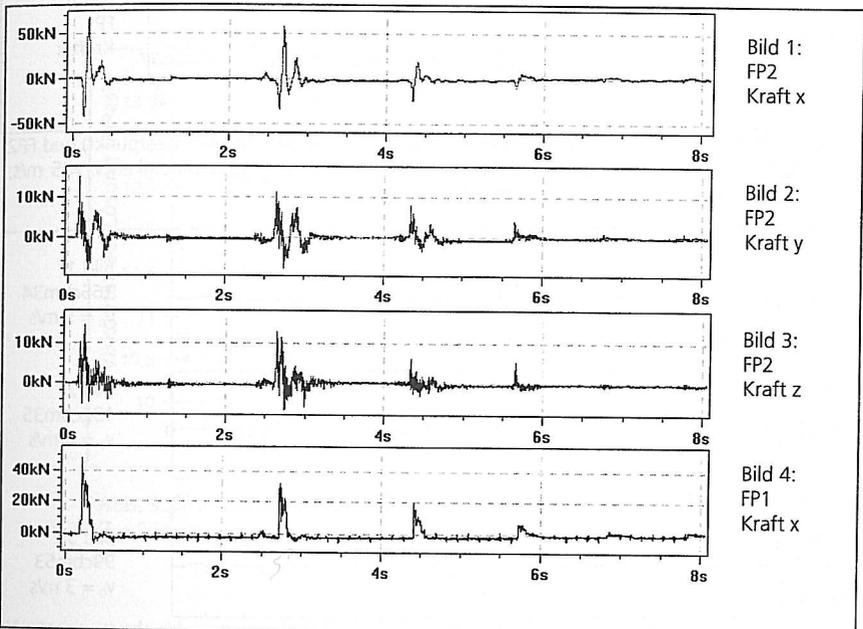


Abb. 5.18: Zeitlicher Verlauf der Kraftkomponenten an den Meßstellen FP1 (Festpunkt) und FP2 (Wendepunkt); Schnellschluß bei der stationären Strömungsgeschwindigkeit $v_0 = 5$ m/s, Versuch 165cbm34, mit Rohrbrücke, Armatur an Pos. 2, Versuchsleitung DN100

Beim Betrieb *ohne* Rohrbrücke ergeben sich bei gleicher Flüssigkeitsgeschwindigkeit von 5 m/s die in Abb. 5.19 dargestellten zeitlichen Kraftverläufe. Die auftretenden Wechsellasten am Wendepunkt in axialer Richtung sind erheblich kleiner als beim Betrieb mit Rohrbrücke (vgl. Bild 5.18; Bild 1, Differenz ca. 110 kN.), für die übrigen Kraftkomponenten (Bilder 2 und 3) werden erheblich kleinere Beträge erfaßt. Der axiale Krafteintrag in den Festpunkt 1 (Bild 4) ist annähernd so groß wie in den Wendepunkt (Bild 1), jedoch von längerer Dauer.

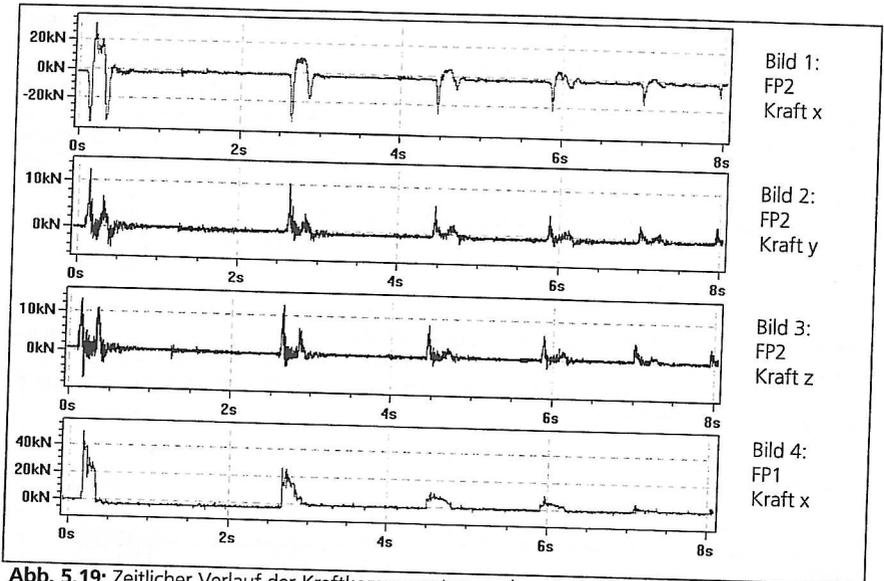


Abb. 5.19: Zeitlicher Verlauf der Kraftkomponenten an den Meßstellen FP1 (Festpunkt) und FP2 (Wendepunkt); Versuch 165cbm25 mit der stationären Strömungsgeschwindigkeit $v_0 = 5 \text{ m/s}$; ohne Rohrbrücke, Armatur an Pos. 2, Versuchsleitung DN100

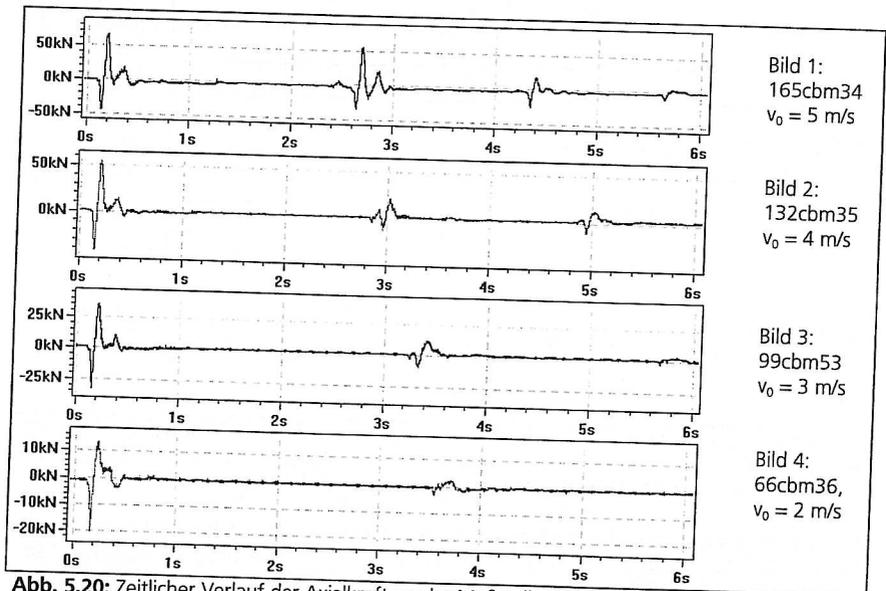


Abb. 5.20: Zeitlicher Verlauf der Axialkraft an der Meßstelle FP2 (Wendepunkt) für unterschiedliche stationäre Strömungsgeschwindigkeiten, Versuche mit Rohrbrücke, Armatur an Pos. 2, Versuchsleitung DN100

In Abb. 5.20 sind die axialen Kraftverläufe am Festpunkt FP2 in Abhängigkeit von der stationären Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Man erkennt eine Zunahme der Kraftamplituden von ca. 30 kN ($v_0 = 2$ m/s) bis auf ca. 100 kN ($v_0 = 5$ m/s). Analog zu den gemessenen Druckspitzen bei dieser Versuchsvariante (Armatur an Pos. 2, vgl. Abschnitt 5.2.6) werden die Zeiten bis zum Auftreten der weiteren Schläge mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit kürzer, da die laufende Pumpe mit entsprechend höheren Drehzahlen höhere Systemdrücke erzeugt.

5.2.10 Druckstoßversuche mit höherviskosen Medien

Zunächst ist für diese Versuchsreihe das Fließverhalten der Lösung zu bestimmen. Die Abb. 5.21 zeigt die Viskosität der Lösung in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit des Viskosimeters. Obwohl ein geringfügiger Anstieg der Viskosität zu erkennen ist, handelt es sich bei der Lösung um eine Newtonsche Flüssigkeit. Der geringe Anstieg kann mit einer Wirbelbildung am Rotationskörper des Meßgerätes erklärt werden.

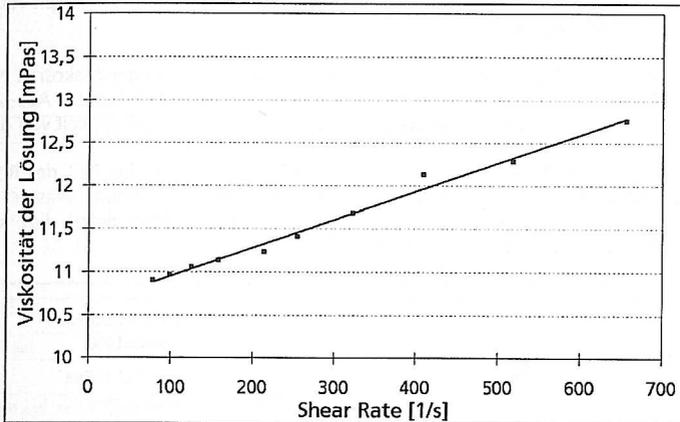


Abb. 5.21: Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit ($T = 20$ °C)

Weiterhin wurde die Viskosität der sich in der Anlage befindlichen Lösung mit einer im Labor erstellten Kalibrierkurve verglichen (s. Abb. 5.22). Es ist zu erkennen, daß beide Kurven nahezu identisch sind. Dies deutet zum einen darauf hin, daß die PEG-Konzentrationen in der Versuchsanlage korrekt sind, zum anderen hat das ständige Umpumpen der Lösung keinen bleibenden Einfluß auf die Viskosität.

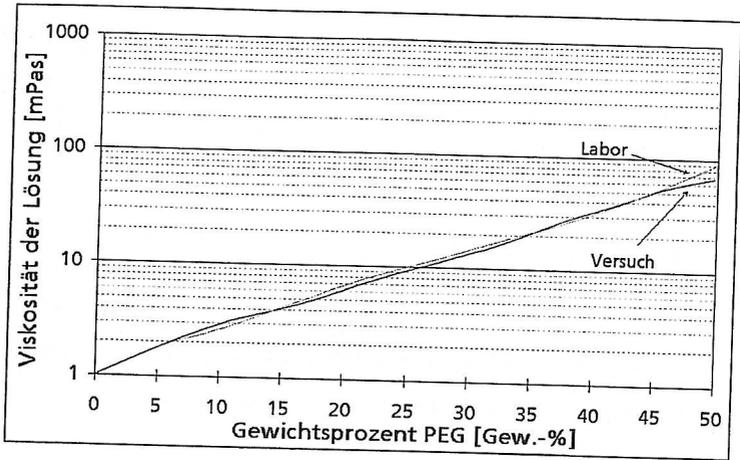


Abb. 5.22: Versuchs- und Labormesswerte der Konzentrationsabhängigkeit von PEG 3000-Lösung bei 20°C

Da der Wirbeldurchflußzähler bei der PEG-Lösung aufgrund der erhöhten Viskosität Meßfehler aufweist, ist die tatsächliche stationäre Strömungsgeschwindigkeit höher. Aus Abb. 3.9 errechnet sich für die PEG-Lösung (50 Gew.-%) eine Strömungsgeschwindigkeit von 4,2 m/s.

Abb. 5.23 zeigt die stationären Drücke an den Meßpositionen P01 bis P23 der Rohrleitung DN50. Vergleichend sind dort die örtlichen Druckverläufe von reinem Wasser und von 50 %-iger PEG-Lösung dargestellt. Ausgehend vom Umgebungsdruck liefert die Pumpe den stationären Druck am Anfang der Rohrleitung (P01).

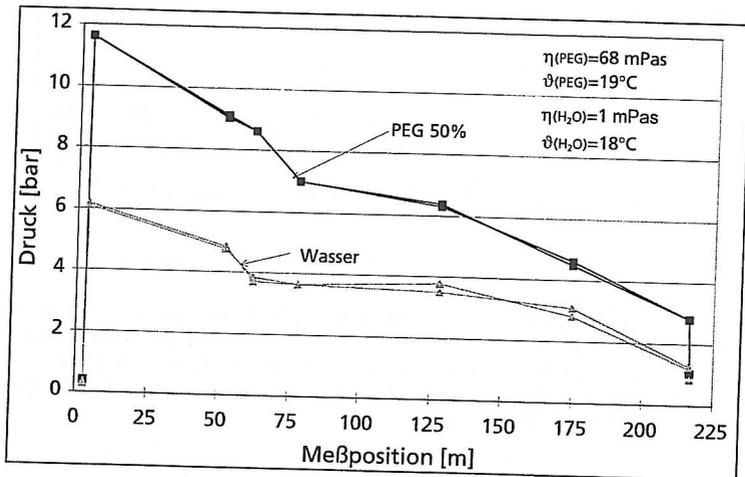


Abb. 5.23: Druckverlust bei der Strömung von PEG 3000-Lösung und Wasser entlang der Rohrleitung, $v_0(\text{Wasser}) = 4 \text{ m/s}$; $v_0(\text{PEG}) = 4,2 \text{ m/s}$

Von diesem Druckniveau fällt der Druck nahezu linear ab. Nach 50 m, im Bereich der Rohrbrücke, erkennt man, daß der Druckabfall größer wird. Der größte Druckabfall ist nach 220 m, im Bereich der Absperrarmatur, zu bemerken. Weiterhin erkennt man, daß die höherviskose Flüssigkeit aufgrund der größeren Reibung einen größeren Druckverlust als die reine Wasserströmung erfährt.

In Abb. 5.24 sind die zeitlichen Druckverläufe in einer PEG-Lösung (50 Gew.-%) und in Wasser an der Meßposition P15 (Wendepunkt) bei einem Druckstoßversuch dargestellt. Die stationäre Strömungsgeschwindigkeit betrug 4 m/s.

Nach dem Absperrn der Armatur verursacht die Verdichtungswelle in beiden Fällen einen Druckanstieg. Dieser ist bei der PEG-Lösung um etwa 10 bar höher. Bei der folgenden Unterdruckwelle fällt der Druck wie gewohnt auf Dampfdruckniveau ab und es bilden sich Kavitationsblasen, die beim Zusammenfall wieder Druckpeaks erzeugen. Im Gegensatz zum Wasser wird bei der PEG-Lösung nur einmal das Dampfdruckniveau erreicht (bei $t = 0,5$ s).

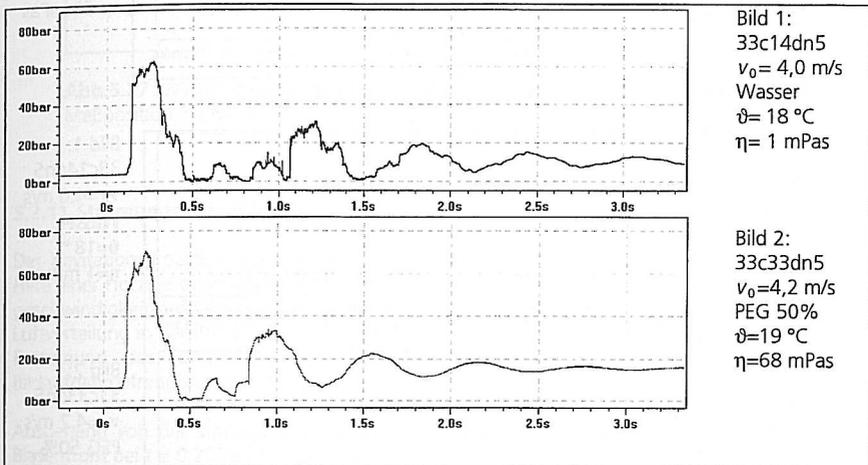


Abb.5.24: Zeitlicher Druckverlauf an der Meßstelle P15 (Wendepunkt)

Betrachtet man den zeitlichen Ausschnitt 0 - 500 ms des Druckverlaufes (s. Abb. 5.25), so wird der erhöhte Druckanstieg in der PEG-Lösung deutlicher. Beide Peaks steigen zu Beginn nahezu identisch an. Dann erfolgt aber der zusätzliche Druckanstieg durch die Reibung, welcher bei der PEG-Lösung steiler verläuft und auf ein um ca. 15 % höheres Niveau ansteigt. Dieser wird durch den sogenannten *Line-Packing-Effekt* [WYLI93] hervorgerufen.

An der Meßposition direkt hinter der Absperrarmatur (P03) erfolgt eine Druckabsenkung bis auf Dampfdruckniveau (s. Abb. 5.26). Durch höhere Reibungsverluste kommt es bei der PEG-Lösung (Bild 2) zu geringeren Amplituden. Auch die Frequenz der Druckstöße ist geringer. Im Vergleich zum reinen Wasser (Bild 1) mit sieben Verdampfungszonen, treten bei der PEG-Lösung (Bild 2) nur drei Verdampfungszonen auf.

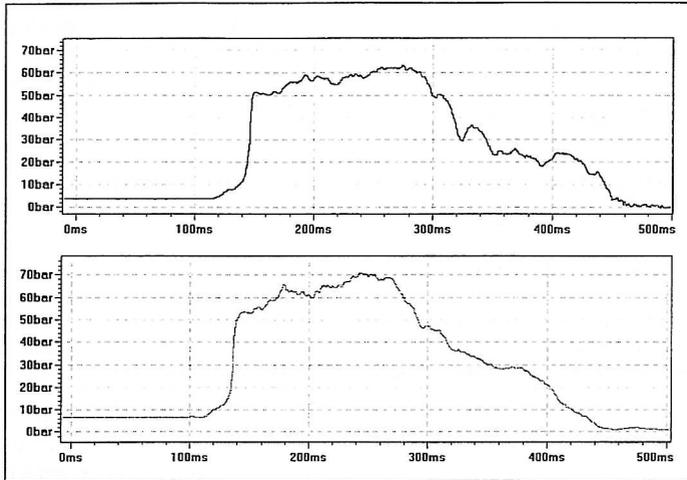


Bild 1:
 33c14dn5
 $v_0=4,0$ m/s
 Wasser
 $\vartheta=18$ °C
 $\eta=1$ mPas

Bild 2:
 33c33dn5
 $v_0=4,2$ m/s
 PEG 50%
 $\vartheta=19$ °C
 $\eta=68$ mPas

Abb.5.25: Erster Druckpeak an der Meßstelle P15 (Wendepunkt)

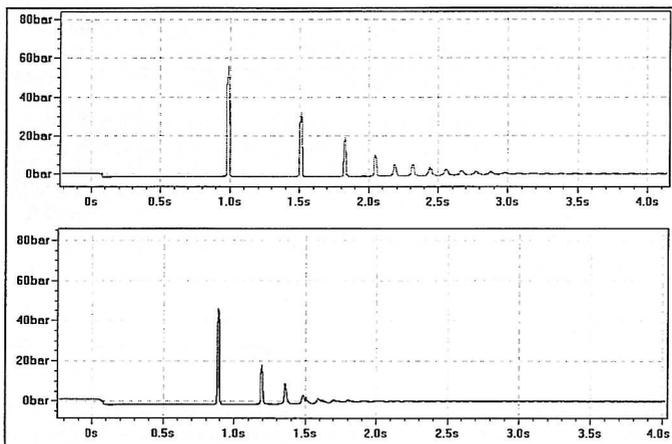


Bild 1:
 33c14dn5
 $v_0=4,0$ m/s
 Wasser
 $\vartheta=18$ °C
 $\eta=1$ mPas

Bild 2:
 33c33dn5
 $v_0=4,2$ m/s
 PEG 50%
 $\vartheta=19$ °C
 $\eta=68$ mPas

Abb.5.26: Zeitlicher Druckverlauf an der Meßstelle P03 hinter der Absperrarmatur

Die maximalen Druckamplituden der Meßstellen P01 bis P23 der PEG-Lösung liegen über denen von Wasser (vgl. Abb. 5.27). Der theoretische Joukowski-Stoß nach Gl. 1.1 liefert eine Druckerhöhung von 60 bar ($\rho = 1068$ kg/m³, $a = 1350$ m/s, $v_0 = 4,2$ m/s).

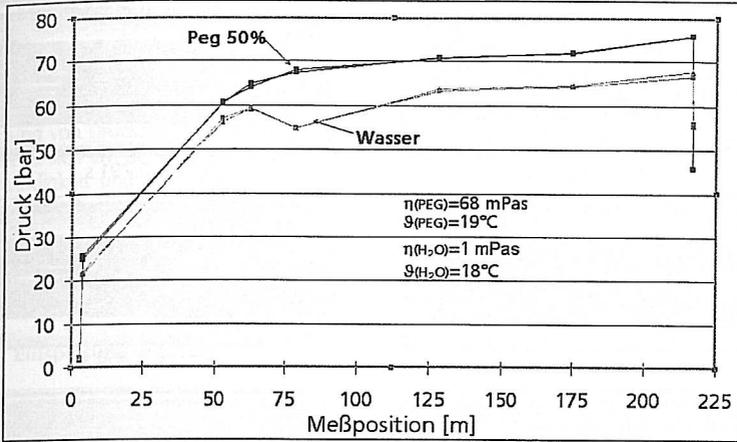


Abb. 5.27 : Maximale Druckamplituden in Abhängigkeit von der axialen Meßposition; $v_0(\text{Wasser}) = 4,0 \text{ m/s}$; $v_0(\text{PEG}) = 4,2 \text{ m/s}$

5.2.11 Strömungsvisualisierung

Der Kavitationsprozeß wurde bei einer stationären Flüssigkeitsgeschwindigkeit von 2 m/s mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera visualisiert. Abb. 5.28 zeigt zehn Bilder der VHS-Hochgeschwindigkeitsaufnahme. Man erkennt den zeitlichen Verlauf der Flüssigkeits- und Dampf-/Luftverteilung in der Rohrleitung nach einem Armaturenschnellschluß (Schließzeit $t = 0,2 \text{ s}$). Die Entfernung des jeweils rechten Bildausschnitts zur Klappe beträgt ca. $0,5 \text{ m}$. Die Bildaufnahmefrequenz betrug 1125 Hz . Eingesetzt wurde Stadtwasser mit etwa $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ausgehend von der stationären einphasigen Strömung (von rechts nach links) erscheint die Blasenfront bei $t = 0,200 \text{ s}$ im rechten unteren Bildausschnitt (Bild II). Nach kurzer Zeit füllt diese Front den gesamten Sichtbereich aus (Bilder IV und V). Nach $0,8 \text{ s}$ erreicht der Flüssigkeitsstand ein Minimum; es werden noch etwa $1/5$ des Leitungsquerschnittes bedeckt (Bild VI). Nach $1,5 \text{ s}$ füllt die in Richtung der Schließarmatur zurücklaufende Flüssigkeitsfront den halben Bildausschnitt (Bild VII). Bild VIII zeigt den Zustand beim Kavitationsschlag. In den Bildern IX und X wird nach etwa $2,0 \text{ s}$ der nun mit geringerer Intensität ablaufende 2. Kavitationsprozeß dargestellt.

Weitere mit einer handelsüblichen VHS-Videokamera durchgeführte Aufnahmen haben gezeigt, daß ab dem 2. Kondensationsprozeß einzelne Luftblasen als disperse Phase am oberen Leitungsrund verbleiben, deren Volumina je nach aktuellem Druck von etwa 1 bis 3 cm Durchmesser oszillieren /DUDL97/. Dieser Ausgasungsprozeß von Luft aus Trinkwasser wurde u.a. auch von Perko /PERK85/ beobachtet und mathematisch beschrieben. In Abb. 5.29 ist eine solche VHS-Aufnahme zu sehen. Die Schnellschlußarmatur befindet sich $0,5 \text{ m}$ stromaufwärts (rechter Bildrad). Der Phasenrand Dampf-Flüssigkeit sowie die stationäre Strömungsrichtung ist eingezeichnet (von rechts nach links). Zum Zeitpunkt der Aufnahme hat die Dampfblase die maximale axiale Ausdehnung erreicht. Das postulierte KoDaKav-Modell (vgl. Kap. 4.2) kann für diese Versuchsanordnung prinzipiell angewendet werden.

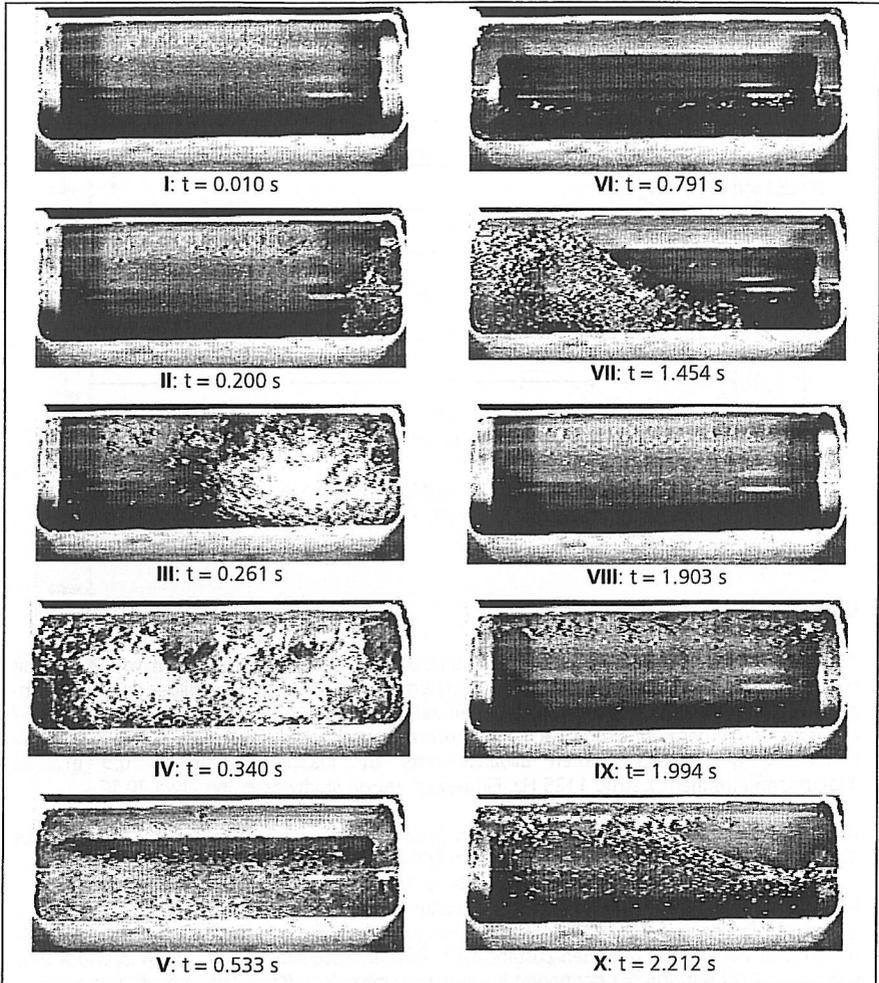


Abb. 5.28: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen an der Meßstelle P03; $v_0 = 2,0$ m/s

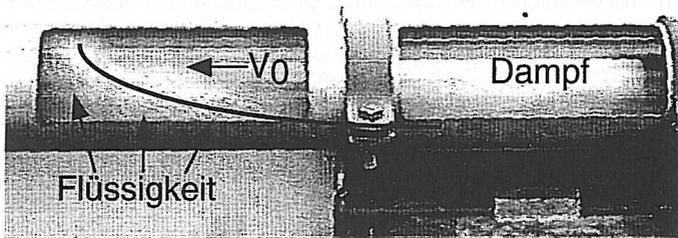


Abb. 5.29: VHS-Aufnahme der sich stromabwärts bildenden, großräumigen Dampfblase

5.3 Maßnahmen zur Vermeidung von Druckstößen und Kavitationsschlägen

In diesem Abschnitt werden neben bekannten Methoden ein innovatives Verfahren zur Dämpfung von Druckstößen und Kavitationsschlägen vorgestellt. Bei den bekannten Verfahren handelt es sich um die Einspeisung von Inertgas zur Minderung der Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit und um die Erhöhung der Schließzeit der Armaturen. Bei dem innovativen Verfahren wird eine Rückschlagarmatur hinter die Absperrarmatur eingebaut.

5.3.1 Einspeisung von Luft

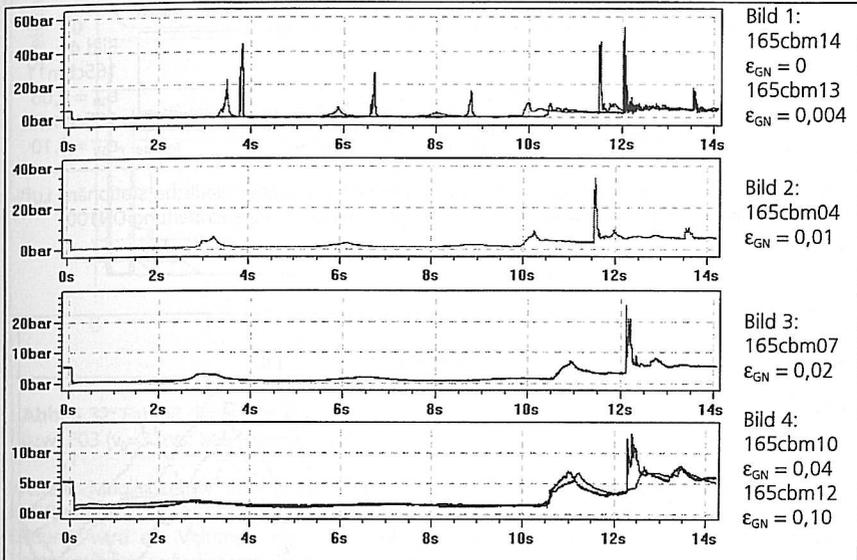


Abb. 5.30: Zeitlicher Druckverlauf an der Meßstelle P03 für unterschiedliche stationäre Luftvolumenanteile ϵ_{GN} ; Versuche mit Rohrbrücke; Armatur an Pos. 1; Versuchsleitung DN100

Abb. 5.30 zeigt die zeitlichen Druckverläufe an der Meßposition P03 bei einer stationären Strömungsgeschwindigkeit von 5 m/s in Abhängigkeit vom zugespeisten Normvolumenstrom an Luft. Man erkennt, daß bereits kleine Luftanteile von 0,4 Norm-Vol.% ausreichen, um die Kavitationsschläge an der Armatur erheblich zu dämpfen (Bild 1, $t = 0 - 10$ s). Die auf der Rohrbrücke entstehenden Kondensationsschläge nach dem Wiederöffnen der Armatur werden jedoch erst bei höheren Volumenströmen an Luft nennenswert reduziert (s. Bild 4).

An der Meßposition P02 (s. Abb. 5.31) ist die Dämpfung erheblich schlechter. Der Druckstoß reduziert sich nur von ca. 75 bar auf 65 bar bei 10 Norm-Vol.% Luft. In einer Entfernung von 10 m stromaufwärts (s. Abb. 5.31a) wird die dämpfende Wirkung der eingespeisten Luft deutlich größer (165cbm14: $p_{max} = 35$ bar; 165cbm12: $p_{max} = 22$ bar).

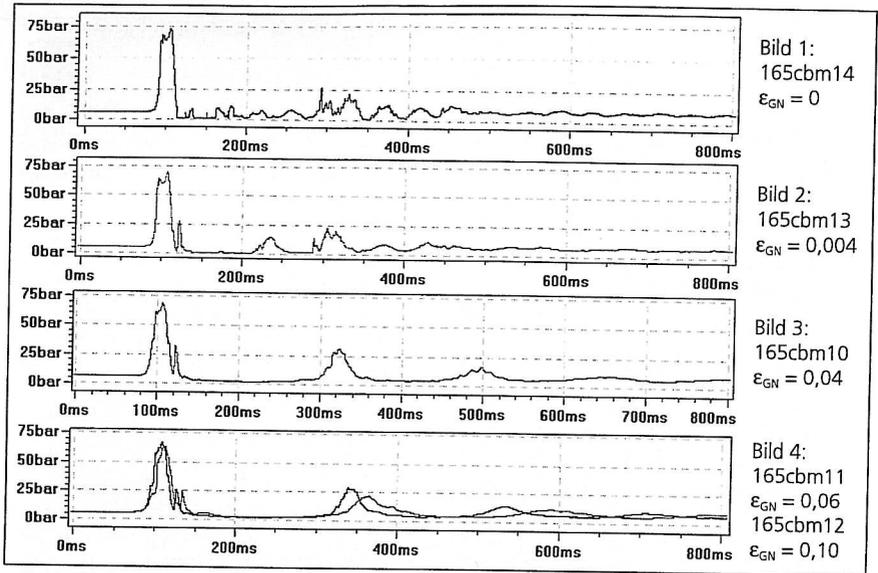


Abb. 5.31: Zeitlicher Druckverlauf an der Meßstelle P02 für unterschiedliche stationäre Luftvolumenanteile ϵ_{GN} . Versuche mit Rohrbrücke, Armatur an Pos. 1, Versuchsleitung DN100

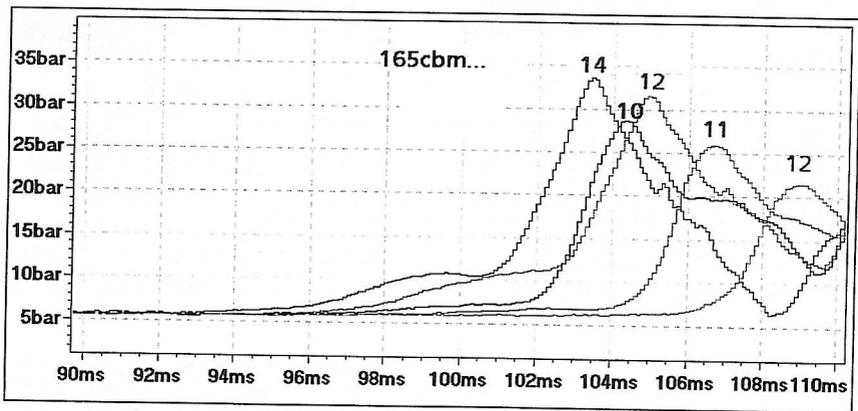


Abb. 5.31a: Zeitlicher Druckverlauf an der Meßstelle P01 (Versuche: 165cbm10 - 165cbm14)

Die dämpfende Wirkung eines dispers in der Transportflüssigkeit verteilten Gases ist im Bereich der Absperrung nur gering. Sie nimmt mit zunehmender axialer Entfernung erheblich zu.

Im Vergleich zur Dämpfung stromabwärts der Schließarmatur ist die Dämpfung stromaufwärts erheblich kleiner.

5.3.2 Vergrößerung der Schließzeit

Der Druckstoß auf der Zulaufseite der schnellschließenden Klappe läßt sich verhältnismäßig leicht durch eine Verzögerung des Schließvorgangs beherrschen. Dabei ist jedoch zu beobachten, daß die Bildung der Kavitationsblase hierdurch nicht unterbunden wird (s. Abb. 5.32, vgl. auch /THOR91/, /PRAS98/). Während die Amplitude der Druckstöße auf der Zulaufseite mit wachsender Schließzeit rasch abnimmt, bleibt die Höhe der Kavitationsschläge praktisch unverändert. Für die Verhinderung dieser Druckstöße wären wesentlich höhere Schließzeiten erforderlich, die vom Standpunkt der möglichst schnellen Unterbrechung des Fluidstroms meist unakzeptabel sind.

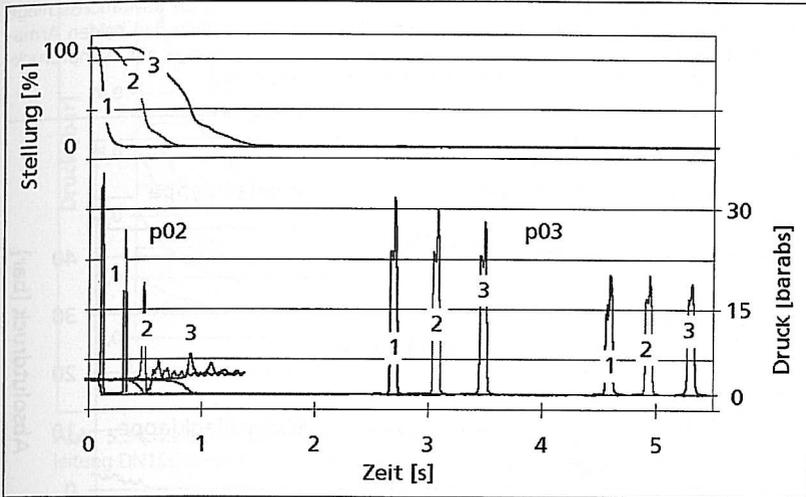


Abb. 5.32: Einfluß der Schließkurven 1, 2 bzw. 3 auf die zeitlichen Druckverläufe an P02 bzw. P03 ($v_0=3$ m/s; Meßleitung DN100)

Weitere Möglichkeiten zur Verhinderung der Kavitationsschläge besteht im Einbau von Belüftungsventilen (/RASC97-2/) oder Windkesseln (/RASC94/) hinter der Absperrarmatur. Dadurch wird ein Volumen aus nichtkondensierbarem Gas geschaffen, welches eine hohe Kompressibilität aufweist und den Kavitationsschlag effektiv dämpft. Durch die Zusp eisung wird außerdem der Druck angehoben, so daß die Abbremsung der Flüssigkeitssäule langsamer erfolgt und die Endgeschwindigkeit nach der Strömungsumkehr wesentlich gesenkt wird. Durch die Luftzusp eisung tritt jedoch mehr Flüssigkeit am Ende der Rohrleitung aus, als dies bei der Abbremsung durch die Druckabnahme auf Sättigungsdruck der Fall sein würde. Das kann bei Leckagestörfällen unerwünscht sein. Abgesehen von den erhöhten Investitionskosten gibt es praktische Einsatzfälle, bei denen eine Verunreinigung des Produkts mit Luft nicht zulässig ist bzw. zu weiteren Gefährdungen führen kann. In diesem Fall muß die Begasung mit einem Inertgas geschehen, was die Betriebskosten erhöht.

5.3.3 Vermeidung von Kavitationsschlägen mit Rückschlagklappen

Eine neue Methode zur Verhinderung von Kavitationsschlägen besteht darin, eine Hilfsarmatur in geeigneter axialer Position hinter der Schließarmatur einzusetzen, so daß die durch das Schließen gebildete Kavitationsblase zwischen Absperr- und Hilfsarmatur eingeschlossen und nicht kollabieren kann. In /PRAS98-2/ wurde z.B. eine freischwingende Rückschlagklappe an unterschiedlichen Stellen zwischen P03 und P06 (vgl. Kap. 3.3.2, Abb. 3.7) eingebaut. Der Mindestabstand x der beiden Armaturen läßt sich für eine unverzweigte, horizontal verlegte Rohrleitung einfach ableiten (vgl. Kap. 6.1.4).

In Abb. 5.33 werden die experimentell ermittelten Druckverläufe bei Versuchen mit (schwarz) und ohne Rückschlagklappe (grau) verglichen. Man erkennt deutlich, daß die Kavitationsschläge unter Verwendung der Rückschlagklappe ausbleiben. Die Blase ist zwischen den beiden Armaturen eingeschlossen und kann nicht kollabieren. Der Druck bleibt solange auf Dampfdruckniveau der Flüssigkeit, bis die Testarmatur wieder langsam geöffnet wird.

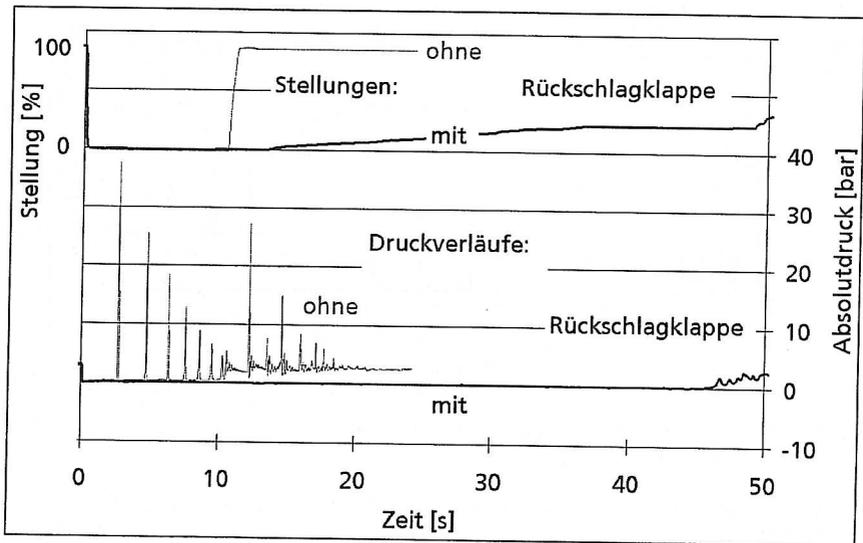


Abb. 5.33: Zeitliche Druckverläufe an der Meßstelle P03 mit bzw. ohne Rückschlagklappe, Versuchsleitung DN100, Betrieb mit Rohrbrücke; Schließarmatur an Pos. 1 (vgl. Abb. 3.6); Hilfsarmatur an Pos. 4 (vgl. Abb. 3.7); $v_0 = 3,0$ m/s

5.4 Einströmen von Luft in eine leere und teilgefüllte Rohrleitung

5.4.1 Zeitliche Druckverläufe

In Abb. 5.34 sind die zeitlichen Behälterdruckverläufe beim Entspannungsvorgang in die Versuchsleitung DN100 dargestellt. Man erkennt, daß die größten Druckgradienten innerhalb der ersten drei Sekunden auftreten. Die t_{50} -Zeit beträgt bei allen Versuchen ca. 3 s. Nach etwa 15 - 20 s ist der Vorgang beendet.

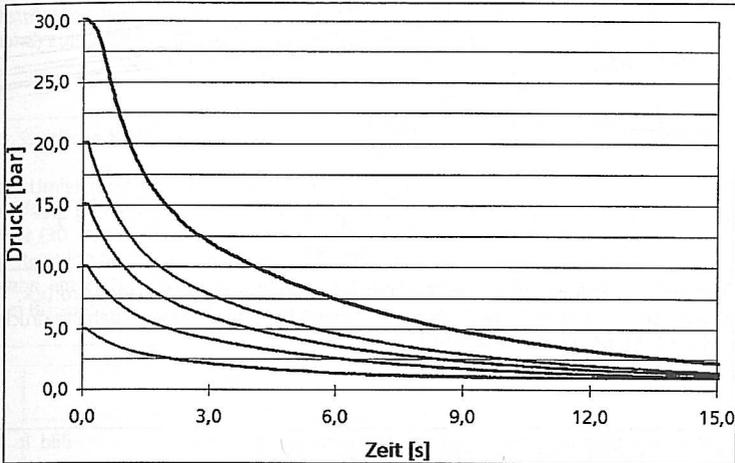


Abb. 5.34: Zeitlicher Druckverlauf im Behälter beim BlowDown in die Versuchsleitung DN100 ohne Rohrbrücke in Abhängigkeit vom Behältervordruck

Abb. 5.35 zeigt die zeitlichen Druckverläufe des Behälterdrucks und ausgewählter Meßstellen in der Rohrleitung bei einem Abblaseversuch. Der Behältervordruck betrug 15 bar und es wurden 49 l Wasser in die Vertiefung 1 vorgelegt. Die Rohrbrücke wurde durch ein axiales Rohrelement ersetzt. Weiterhin ist der zeitliche Verlauf des Behälterdrucks bei einem Versuch ohne Wasservorlage dargestellt. (Meßpositionen s. Abb. 3.11)

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 (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 mit dem Programm FLOWMASTER2 rechnerisch bestimmten Temperatur von weniger als -100 °C. In der Versuchsanlage kann der zeitliche Temperaturabfall aufgrund der Trägheit der Meßfühler jedoch nicht ausreichend genau bestimmt werden.

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. 5.36) mit dieser Versuchsanordnung (ohne Rohrbrücke) bei Antriebsdrücken oberhalb von 25 bar verifiziert.

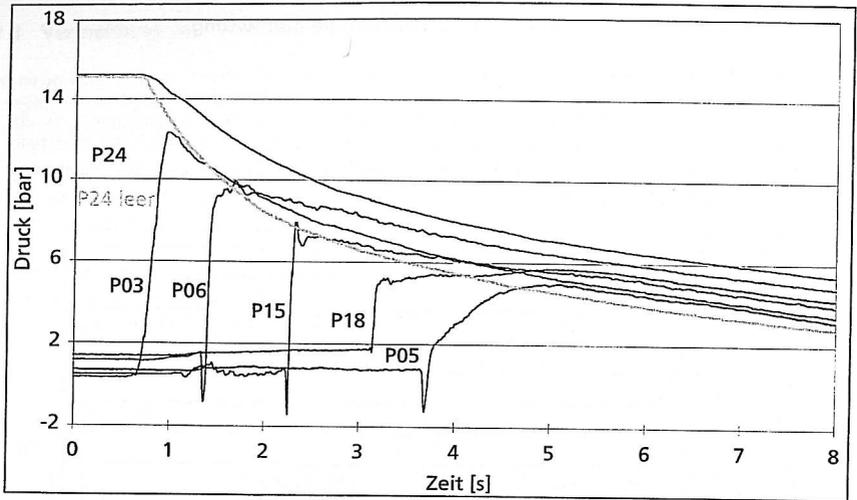


Abb. 5.35: Zeitlicher Druckverlauf beim BlowDown ohne Rohrbrücke; Behälervordruck: 15 bar, Wasservorlage an Vertiefung 1: 49 l; Versuch: 15ba08d1; zum Vergleich: Behälterdruck ohne Wasservorlage (P24, grauer Kurvenverlauf)

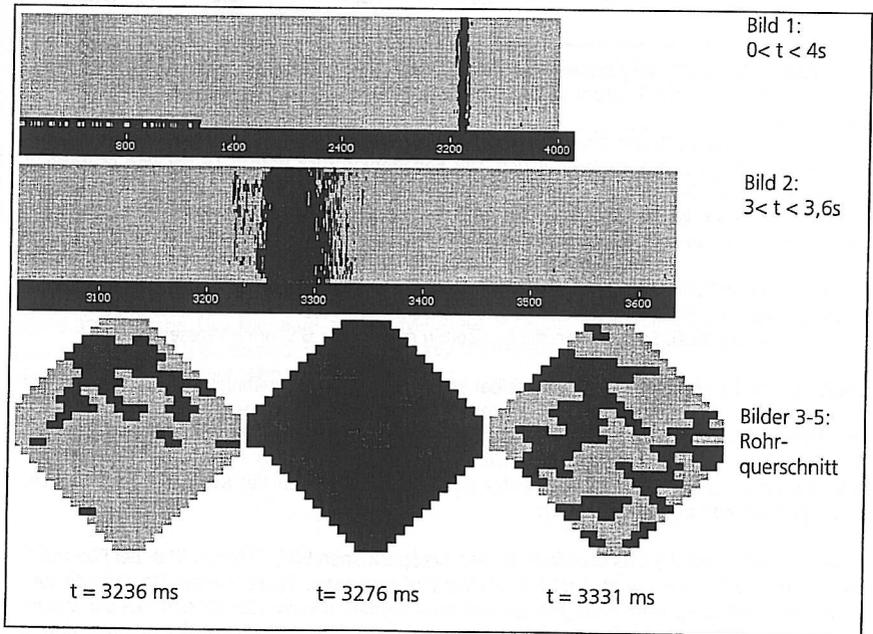


Abb. 5.36: Zeitliche Verläufe von Luft (hell) und Wasser (dunkel) beim Versuch 30ba03d1

Abb. 5.36 stellt den zeitlichen Verlauf der Phasenanteile Luft und Wasser im Rohrleitungsquerschnitt 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) zum Ende der Versuche wurde durch den Sensor nicht wiedergegeben.

5.4.2 Zeitliche Kraftverläufe

Bei der Umlenkung am Wendepunkt (FP2) werden die in Abb. 5.37 dargestellten zeitlichen Kraftverläufe gemessen. Analog zum Druckanstieg (linke Achse) erfolgt der Kräfteintrag in das Festlager (30 kN in Querrichtung $Kx2$, Versuch: 15ba08d1, vgl. Abb. 5.34). 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.

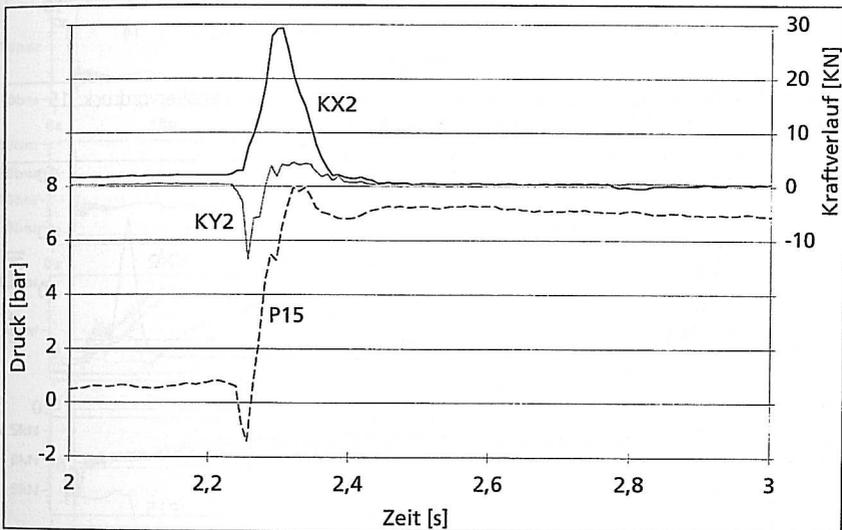


Abb. 5.37: Zeitlicher Kräfteverlauf beim BlowDown ohne Rohrbrücke, Behältervordruck: 15 bar, Wasservorlage: 49 l (Versuch: 15ba08d1)

5.4.3 Einfluß senkrechter Leitungsabschnitte

Abb. 5.38 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. 5.35). Im Unterschied zum Betrieb ohne Rohrbrücke ist ein sprunghafter Anstieg des Drucks an den Meßstellen P06 und P09 auf Beträge oberhalb des Behältervordrucks zu erkennen.

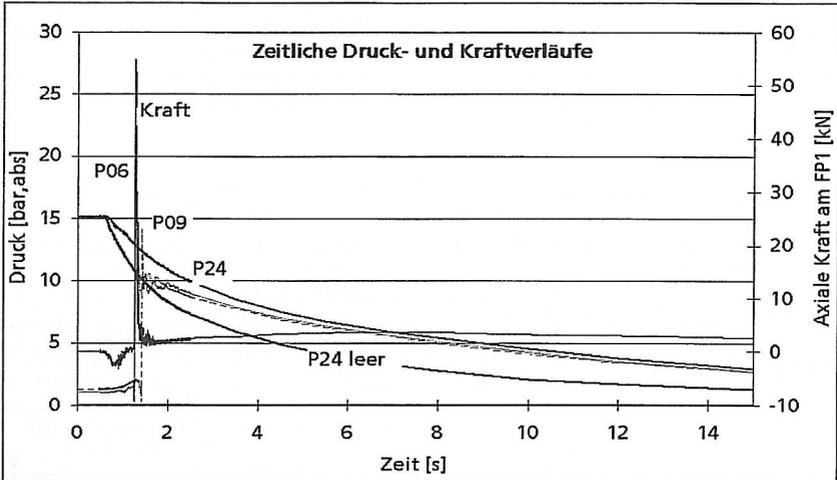


Abb. 5.38: Zeitliche Druckverläufe beim BlowDown mit Rohrbrücke, Behältervordruck: 15 bar, Wasservorlage: 49 l an Vertiefung 1 (Versuch: 15ba17d1)

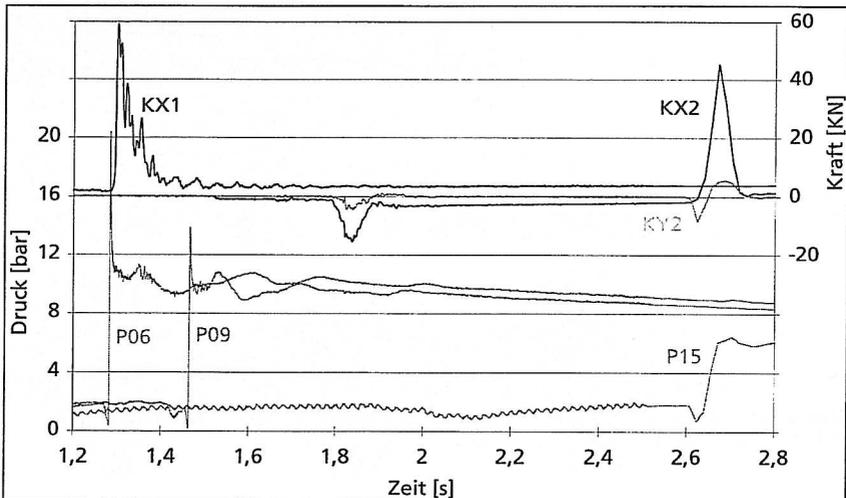


Abb. 5.39: Zeitlicher Kräfteverlauf beim BlowDown mit Rohrbrücke, Behältervordruck: 15 bar, Wasservorlage: 49 l an Vertiefung 1 (Versuch: 15ba17d1)

Die Druckantworten sind denen der Druckstöße z.B. beim schnellen Absperrn flüssigkeitsfördernder Rohrleitungen ähnlich (vgl. /DUDL97/). Diese Versuchsanordnung führt zu den in Abb. 5.39 dargestellten zeitlichen Kraftverläufen.

Wenn Flüssigkeit auf den ersten Rohrbogen der Rohrbrücke wirkt ($t = 1,3$ s), wirkt auf den vorderen Kraftaufnehmer (FP1) ein axialer Kraftbetrag von etwa 58 kN ($Kx1$). Die Kraftauschläge 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 Pfropfenstabilisierung durch senkrechte Leitungsabschnitte erheblich begünstigt wird.

5.5 Einströmen von Wasser in eine leere Rohrleitung

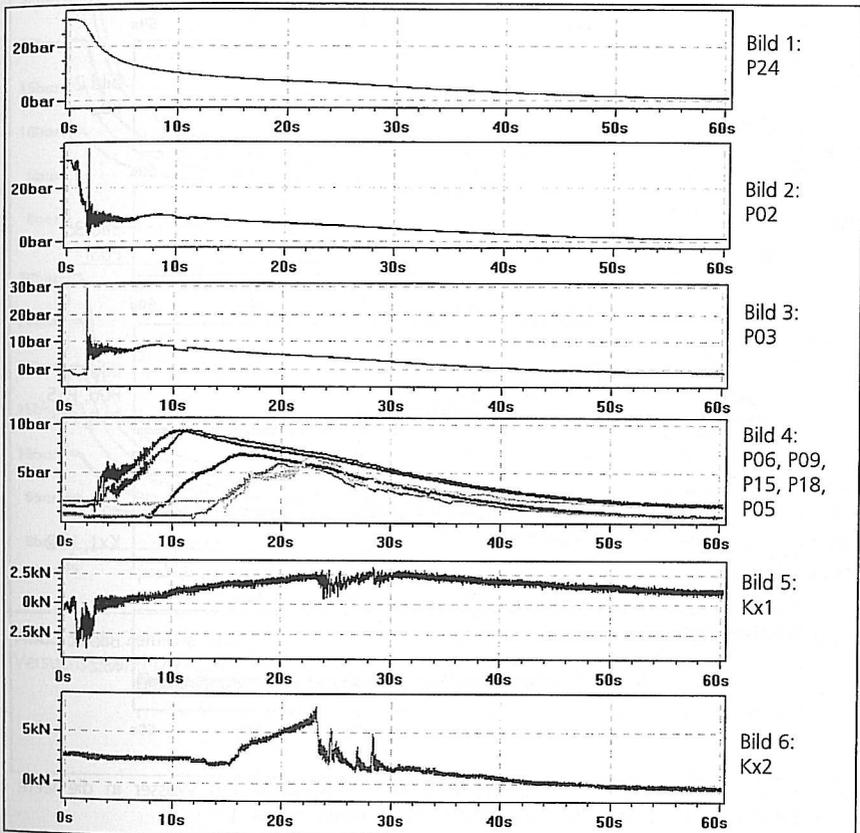


Abb. 5.40: Zeitliche Druck- und Kraftverläufe beim Einströmen von Wasser in die leere Versuchsleitung DN100, Versuche *mit* Rohrbrücke, Armatur an Pos. 1; (vgl. Abb. 3.11)

Abb. 5.40 zeigt die zeitlichen Druck- und Kraftverläufe beim Einströmen von Wasser in die leere Versuchsleitung DN100. Der Druck im Druckbehälter nimmt kontinuierlich und stetig ab. Der Druckverlauf ist dem des Blowdowns von Luft ähnlich (vgl. Kap. 5.4, Abb. 5.34). An den Positionen P02 und P03 (vgl. Bilder 2 und 3) sind kurzzeitig höhere Druckspitzen zu erkennen, die möglicherweise durch den Öffnungsvorgang hervorgerufen werden. Der Druckanstieg setzt sich im gesamten Leitungssystem fort (s. Bild 4, Meßpositionen P06 bis P05).

Die Werte am Druckaufnehmer P05 müssen aufgrund einer fehlerhaften Nullpunktskalibrierung um etwa 2 bar herabgesetzt werden. Der Einströmvorgang verursacht die in Bild 5 und 6 dargestellten zeitlichen axialen Kräfteinträge F_{x1} am Festpunkt 1 und am Festpunkt 2 (F_{x2}).

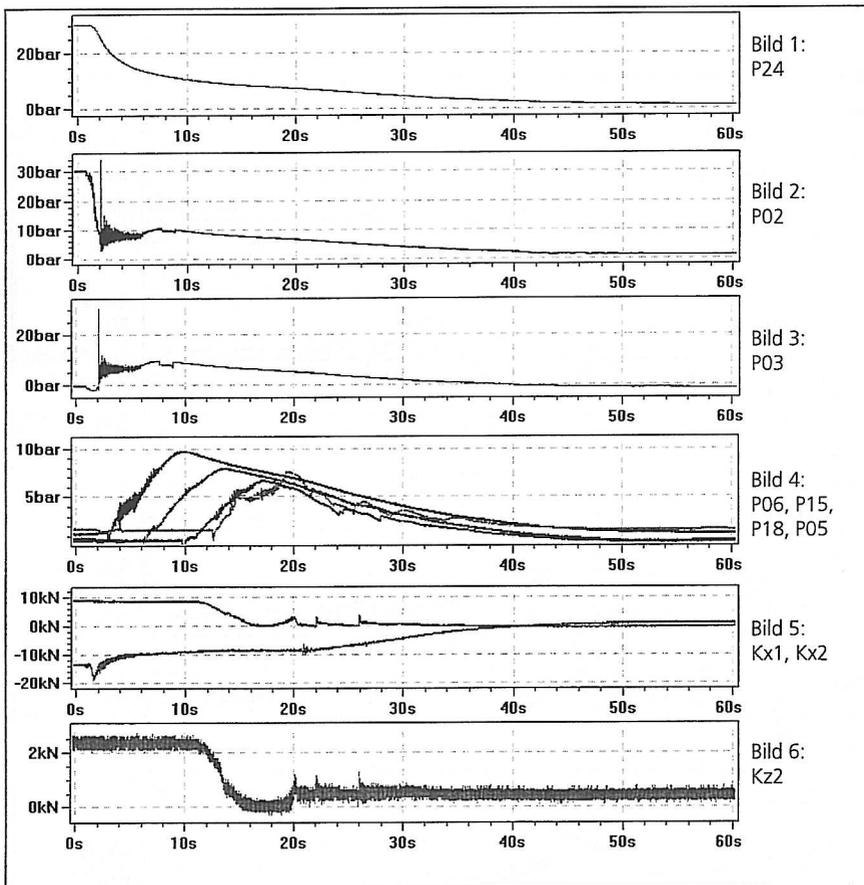


Abb. 5.41: Zeitliche Druck- und Kraftverläufe beim Einströmen von Wasser in die leere Versuchsleitung DN100, Versuche *ohne* Rohrbrücke, Armatur an Pos. 1

Abb. 5.41 zeigt die zeitlichen Druck- und Kraftverläufe beim Einströmen von Wasser in die leere Versuchsleitung DN100 bei einem Versuch mit gleichem Anfangsdruck, jedoch ohne Rohrbrücke. Die zeitlichen Druckverläufe sind denen mit Rohrbrücke ähnlich (vgl. Abb. 5.40), die Kräfteinträge in die Festpunkte 1 und 2 (s. Bild 5) sind jedoch größer, da die fehlende Rohrbrücke nun nicht mehr als Dämpfungselement zur Verfügung steht.

Abb. 5.42 zeigt den Behälterdruck-Zeit-Verlauf in Abhängigkeit vom Behältervordruck. Bild 1 zeigt Versuche mit einigen Wiederholungsversuchen beim Betrieb mit Rohrbrücke, Bild 2 ohne Rohrbrücke. Die geringfügig voneinander abweichenden Kurvenverläufe entstanden durch das manuelle Öffnen des Kugelhahns DN100. Die Leitungsgeometrie ist bei diesen Versuchsreihen von untergeordneter Bedeutung für die Entlastung des Druckbehälters.

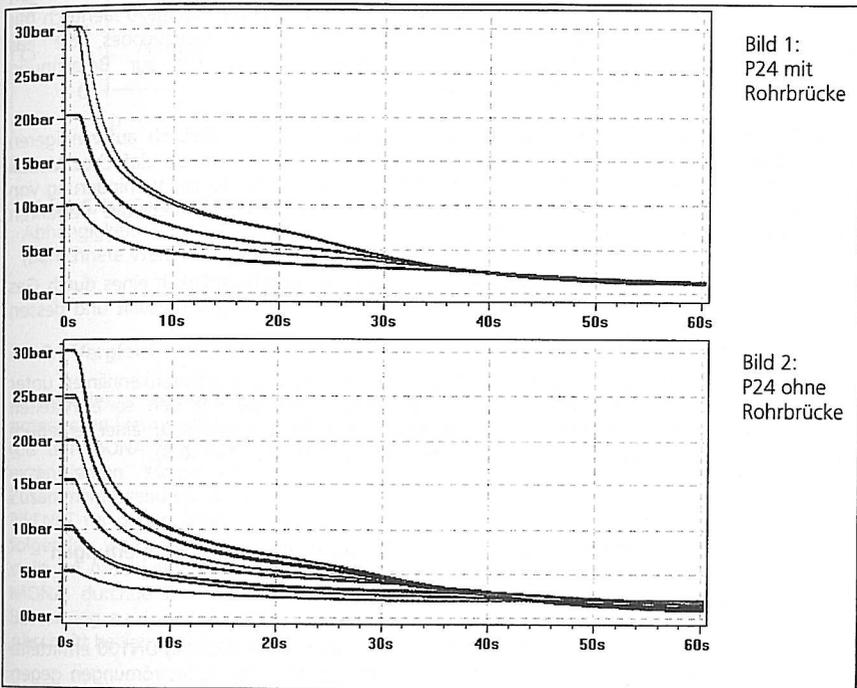


Bild 1:
P24 mit
Rohrbrücke

Bild 2:
P24 ohne
Rohrbrücke

Abb. 5.42: Zeitliche Druck- und Kraftverläufe beim Einströmen von Wasser in die leere Versuchsleitung DN100 in Abhängigkeit vom Anfangsdruck; Armatur an Pos. 1

6 Ergebnisse der vergleichenden Simulationen

In diesem Kapitel werden zunächst die Berechnungen zu ausgewählten, in Kap. 5 beschriebenen experimentellen Ergebnissen vorgestellt (Kap. 6.1). Auswahlkriterium ist das charakteristische Abweichen der Programmresultate von den experimentell ermittelten Daten aufgrund von physikalischen Phänomenen, die in der Berechnungssoftware vereinfacht oder nicht berücksichtigt werden.

Ausgehend von der Berechnung der Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit, die für viele Berechnungsprogramme als Eingabeparameter vorab zu bestimmen ist (vgl. Kap. 6.1.1), werden die mit dem Programm FLOWMASTER2 durchgeführten Vergleichsrechnungen vorgestellt (s. Kap. 6.1.2). Die Berechnungen mit diesem Programm sind nahezu identisch mit den Vorhersagen der weiteren in dieser Arbeit untersuchten Rechencodes, die das Charakteristikenverfahren verwenden (PIPENET, WANDA, SIR-3S). Die zur Berechnung benutzten Programmversionen sind in Tab. 4.2 angegeben.

Anschließend erfolgt eine vergleichende Darstellung der mit dem erheblich aufwendigeren Rechencode MONA erzielten Ergebnisse (Kap. 6.1.3). In Kap. 6.1.4 wird ein einfaches Modell zur Bestimmung der Einbauposition einer Hilfsarmatur beschrieben, die zur Verhinderung von Kavitationsschlägen dient. Dieses im Rahmen dieser Arbeit entwickelte innovative Verfahren wird in Kap. 5.33 näher erläutert.

In Kap. 6.2 wird ein Modell zur Berechnung von Druck und Geschwindigkeit eines durch Gas beschleunigten Flüssigkeitspfropfens in einer horizontalen Rohrleitung vorgestellt und dessen Vorhersagen mit Meßergebnissen verglichen.

Abschließend wird ein innovatives Verfahren zur Bestimmung von Armaturen Kennlinien unter instationären Bedingungen vorgestellt. Es wird gezeigt, daß die mit den so ermittelten *dynamischen* Armaturen Kennlinien durchgeführten Vergleichsrechnungen zu einer erheblich besseren Übereinstimmung von Messung und Berechnung führen (s. Kap. 6.3).

6.1 Druckstöße und Kavitationsschläge in flüssigkeitsfördernden Rohrleitungen

6.1.1 Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit

In Abb. 6.1 sind berechnete und durch Laufzeitmessungen in der Meßleitung DN100 ermittelte Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeiten in ein- und zweiphasigen Rohrströmungen gegenüber den auf Normbedingungen (273 K, 1 bar) bezogenen volumetrischen Gasgehalt aufgetragen.

Im Diagramm ist eine gute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Werten zu erkennen. Ausgehend von der einphasigen Wasserströmung (etwa 1250 m/s) fällt die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit je nach Anlagengeometrie und der vorher eingestellten stationären Strömungsgeschwindigkeit kontinuierlich ab. Die stationäre Strömungsgeschwindigkeit bestimmt die Stärke des Kondensationsschlags nach dem Wiederöffnen und damit das Druckniveau, mit dem sich die Druckwelle ausbreitet. Beim Bypass der Rohrbrücke wurde die Ausbreitungsgeschwindigkeit nach Ventilschluß gemessen. Dabei beträgt der Strömungsdruckverlust etwa 5 bar. Dies führt zu kleineren Volumenanteilen an Luft in der Versuchsleitung und damit zu höheren Beträgen der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit.

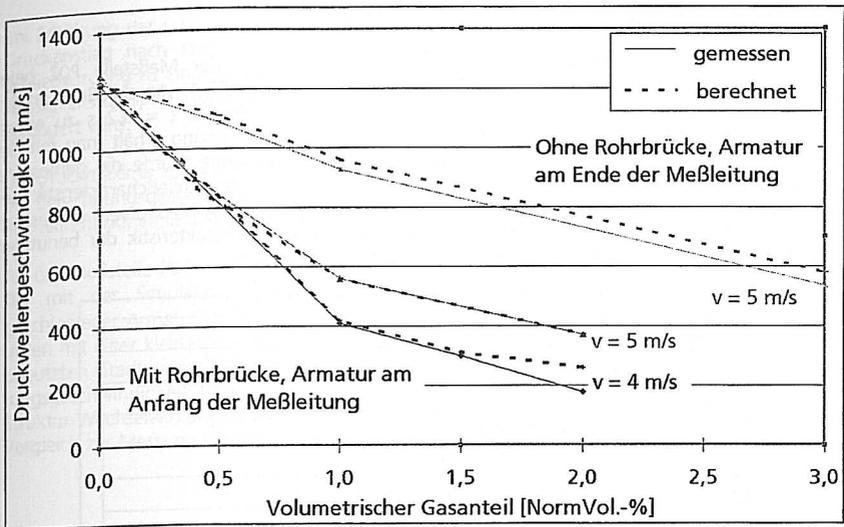


Abb. 6.1: Gemessene und berechnete Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Anlagengeometrie und der stationären Strömungsgeschwindigkeit (berechnete Werte nach Perko /PERK85/)

6.1.2 Vergleichende Untersuchungen mit dem Rechencode FLOWMASTER 2

Der Vergleich von Messung und Berechnung erfolgt in drei Schritten. Nach Analyse der potentiellen Leistungsfähigkeit der Projektsoftware (vgl. Kap. 4.2) wurden mit allen Rechenodes (bis auf MONA) vergleichende Simulationen zum Thema Armaturenschnellschluß mit einer exzentrischen Klappe in der flüssigkeitsfördernden Rohrleitung DN100 durchgeführt. Zusammenfassend wurde festgestellt, daß die Programme WANDA, FLOWMASTER, SIR-3S und PIPENET für diesen Berechnungsfall (vgl. Kap. 3.3.1) nahezu identische Ergebnisse liefern. Im folgenden werden charakteristische, mit FLOWMASTER2 durchgeführte Simulationen vorgestellt. Im Anschluß werden die vom Projektpartner Studsvik Scandpower mit dem Rechenode MONA durchgeführten Simulationen diskutiert. Abschließend erfolgt eine vergleichende Bewertung zu den Meßwerten. Die Angabe aller Meß- und Berechnungspositionen in diesem Abschnitt beziehen sich auf Abb. 3.6

Die Simulationen wurden unter den folgenden Annahmen durchgeführt (vgl. Kap. 6.1.3)

- Volumenanteil an Luft: 0
- Rohrrauigkeit: 0,03 mm
- Zeitschritte Versuchsleitung DN100: $\leq 0,001$ s
- Zeitschritte Versuchsleitung DN50: $\leq 0,0009$
- Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (DN100): 1220 m/s
- Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (DN50): 1350 m/s
- Druckverluste an Rohrbögen nach Miller /MILL90/

Einfluß der stationären Strömungsgeschwindigkeit

Ausgehend vom stationären Systemdruck steigt der Druck an der Meßstelle P02 beim Schließvorgang an (Versuchsszenario und Meßpositionen: vgl. Kap. 3.3.1). Anschließend erfolgt der Druckabfall auf Dampfdruckniveau, bevor die Reflexionswelle bei $t = 0,2$ s zu einem weiteren Druckanstieg auf etwa 10 bar führt. Im Vergleich zur Messung erhält man mit der Rechnung kleinere Druckamplituden (s. Abb. 6.2). Für die Rechnung wurde die gemessene Druckwellengeschwindigkeit (1260 m/s, vgl. Abb. 5.3) sowie die Schließcharakteristik der Stellungsrückmeldung mit dem Hall-Sensor (vgl. Abb. 5.1, Hall-Sensor-Meßkurven) eingesetzt. Möglicherweise liefert die vom Hersteller angegebene Durchflußcharakteristik der benutzten exzentrischen Klappe (vgl. Abb. 4.4) zu kleine Widerstandsbeiwerte.

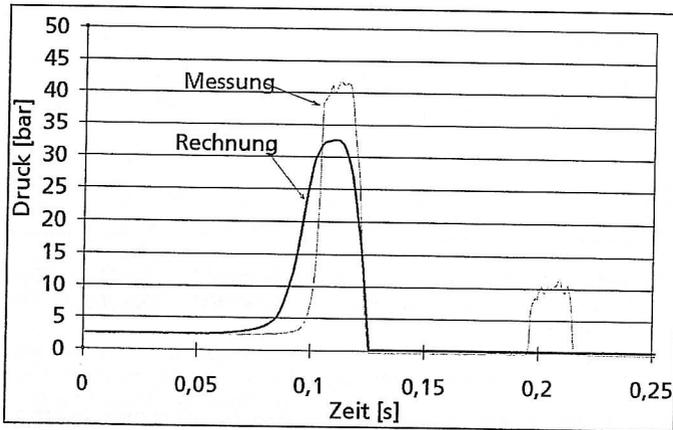


Abb. 6.2: Vergleich von Messung und Rechnung an der Meßstelle P02; $v_0 = 3,0$ m/s; (Versuch: 99cbm28, Simulation: dsa-full-unforce-res74)

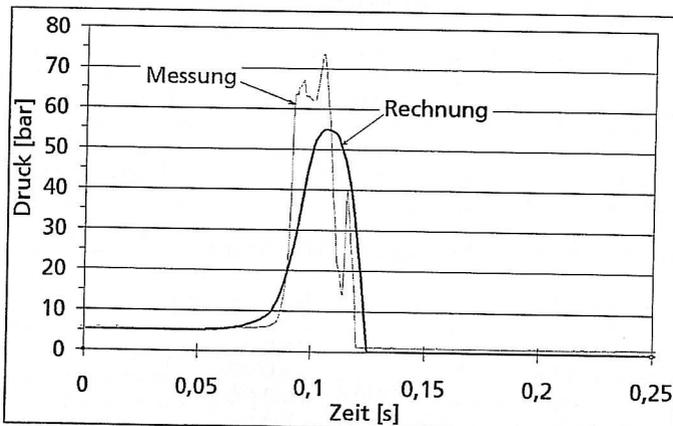


Abb. 6.3: Vergleich von Messung und Rechnung an der Meßstelle P02; $v_0 = 5,0$ m/s; (Versuch: 165cbm22, Simulation: dsa-full-unforce-res81)

Bei Erhöhung der stationären Flüssigkeitsgeschwindigkeit (s. Abb. 6.3) erfolgt der gemessene Druckanstieg nach kürzerer Zeit (90 ms). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, daß der Schließvorgang zu einer Verdampfung des Wassers im engsten Querschnitt führt, wodurch der Flüssigkeitstransport durch die Armatur schon vor dem vollständigen Schließen schlagartig verzögert wird.

Die Druckmaxima von 72 bar (bzw. 43 bar gemäß Abb. 6.2) liegen um ca. 12 % oberhalb der mit Berechnungsgleichung nach Joukowsky (Gl. 4.1) berechneten Werte. Dies ist möglicherweise auf Teilreflexionen im Leitungssystem zurückzuführen.

An der Meßstelle P03 werden die in Abb. 6.4 dargestellten zeitlichen Druckverläufe erhalten. Die mit der Simulation (grauer Kurvenverlauf) ermittelten Druckoszillationen sind bei geschlossener Armatur ($t \leq 10$ s) um ca. 10 % niedriger als die gemessenen Druckmaxima und treten mit einer kleineren Frequenz auf. Der Grund dafür ist die Ausgasung von Luft aus dem benutzten Stadtwasser bei der Druckabsenkung, was zur Herabsetzung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit führt (vgl. /PERK85/); möglicherweise ist auch ein Einfluß von Fluid-Struktur-Wechselwirkungen vorhanden /ENKE97/. Nach dem Öffnen der Armatur werden im Vergleich zur Messung höhere Werte und eine größere Anzahl kleinerer Druckmaxima erhalten.

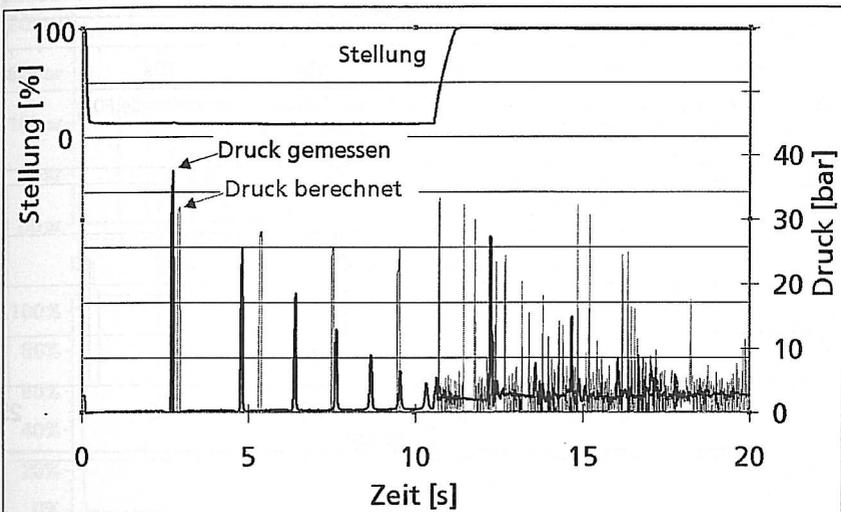


Abb. 6.4: Vergleich von Messung und Rechnung an der Meßstelle P03; $v_0 = 3,0$ m/s; (Versuch: 99cbm28, Simulation: dsa-full-unforce-res74)

Mit Erhöhung der stationären Flüssigkeitsgeschwindigkeit werden ähnliche Ergebnisse erzielt (s. Abb. 6.5). Die berechneten Amplituden sind etwas kleiner als die gemessenen und treten mit kleinerer Frequenz auf. Da die Zeitintervalle, in denen Dampfdruck vorliegt, größer sind als beim Versuch mit 3 m/s, kann mehr gelöste Luft ausgasen und die Dämpfung der Kavitationsschläge ist entsprechend höher.

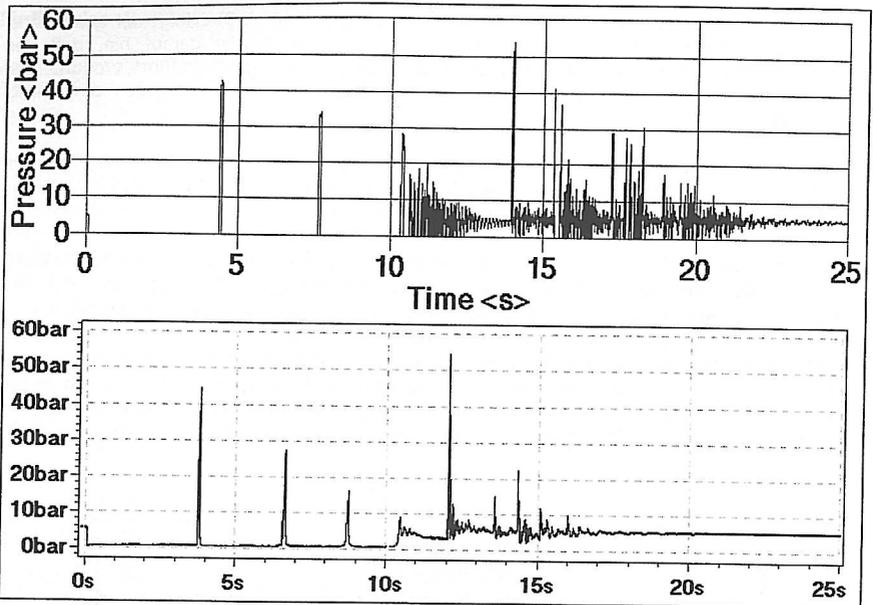


Abb. 6.5: Vergleich von Messung (unten) und Rechnung (oben) an der Meßstelle P03;
 $v_0 = 3,0$ m/s (Versuch: 165cbm14, Simulation: dn100-full-uniforce-res82)

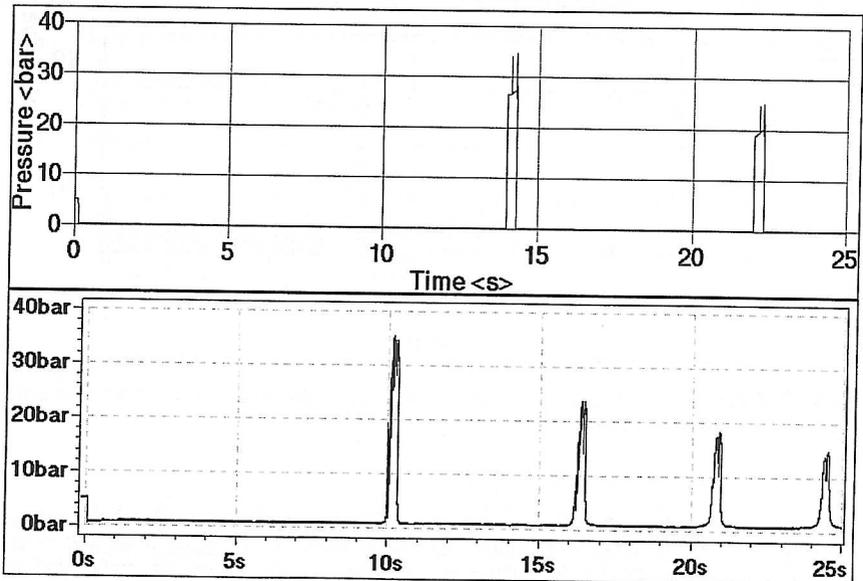


Abb. 6.6: Vergleich von Messung (unten) und Rechnung (oben) an der Meßstelle P03;
 $v_0 = 5,0$ m/s (Versuch: 165cbm22, Simulation: dn100-full-uniforce-bypass-res1)

Einfluß der Leitungsgeometrie

Bei den Versuchen ohne Rohrbrücke werden die Zeitintervalle, in denen an der Meßposition P03 Dampfdruck vorliegt, noch größer (s. Abb. 6.6). Die Abweichungen von Messung und Rechnung nehmen entsprechend zu.

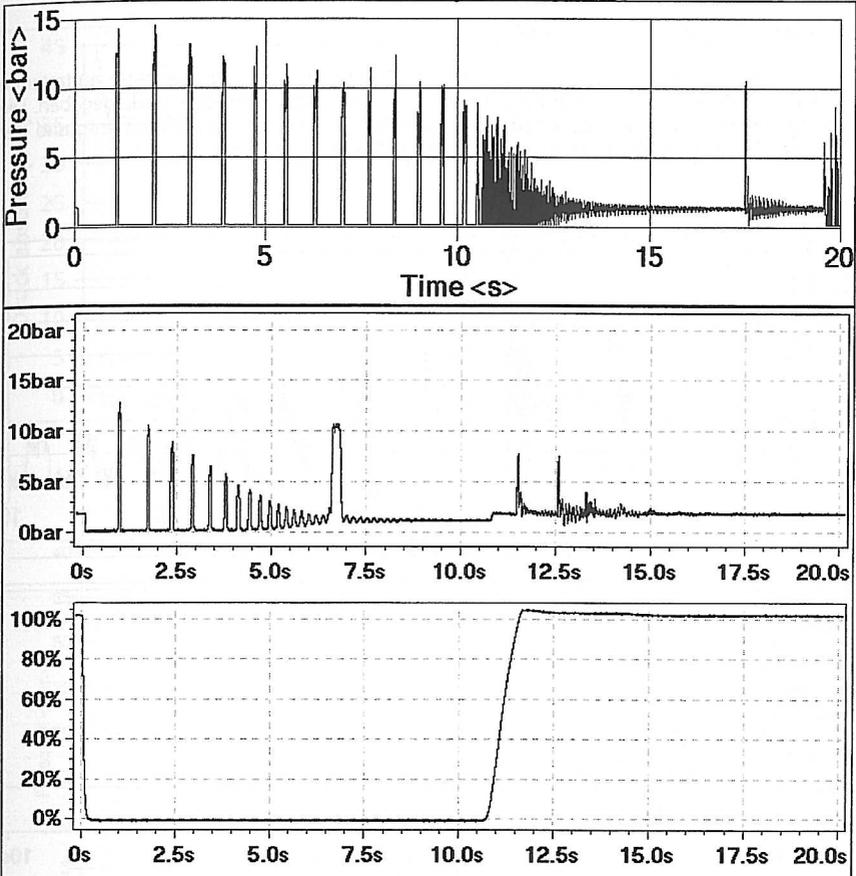


Abb. 6.7: Vergleich von Messung (mittleres Bild) und Rechnung (oberes Bild) an der Meßstelle P03; $v_0 = 1,0 \text{ m/s}$; (Versuch: 08c05dn5, Simulation: dn50-full-unforce-res4), untere Abbildung: zeitlicher Verlauf der Ventilstellung

Einfluß der Leitungsdurchmessers

In der Versuchsleitung DN50 tritt bei $t = 7,0$ s ein Kavitationsschlag auf, der durch Rekondensation der auf der Rohrbrücke entstandenen Dampfblase entsteht (s. Abb.6.7, mittleres Bild). Dies wird von der Rechnung nicht vorausgesagt. Die Druckamplituden in der Berechnung sind so groß wie bei der Messung, treten jedoch mit kleineren Frequenzen auf.

Axiale Position der Schließarmatur

Bei Einbau der Armatur in die Position (Ende der Versuchsleitung) wird der erste auftretende Druckpeak in Höhe und zeitlicher Ausdehnung sehr gut von der Simulation wiedergegeben. Die Dämpfung der Druckpeaks ist aufgrund der gelösten Luft und möglicherweise aufgrund der dämpfenden Fluid-Struktur-Wechselwirkungen bei der Messung größer.

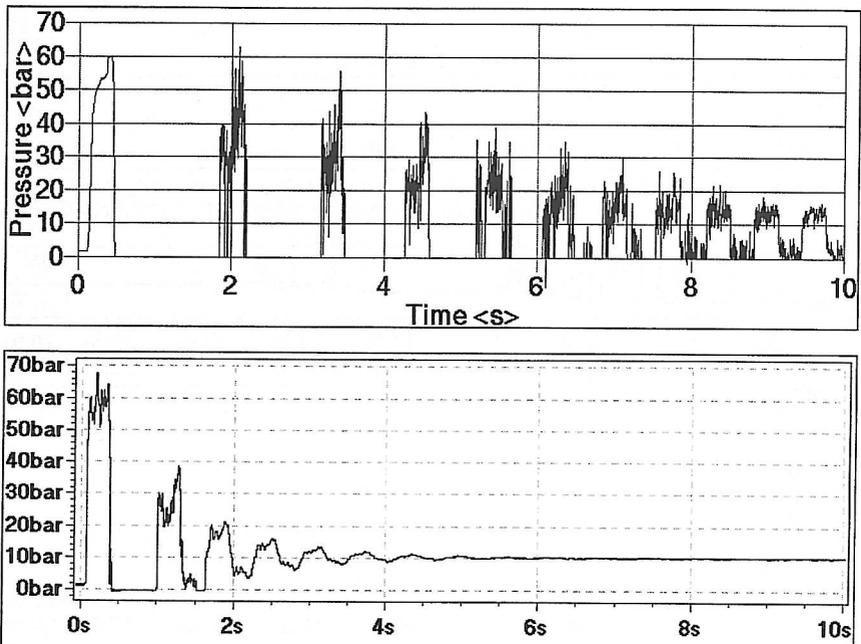


Abb. 6.8: Vergleich von Messung (unten) und Rechnung (oben) an der Meßstelle P03; $v_0 = 4,0$ m/s; (Versuch: 33c05dn5, Simulation: dn50-full-hinten-res3)

Schnelle Regelvorgänge - Armaturenteilschluß

Bei schnellen Regelvorgängen, insbesondere bei unvollständigen Schließvorgängen, können Druckstöße und Kavitationsschläge entstehen (vgl. Kap. 5.28). In Abb. 6.9 ist der Vergleich von Messung und Rechnung an der Position P03 für eine stationäre Flüssigkeitsgeschwindigkeit von 3 m/s dargestellt.

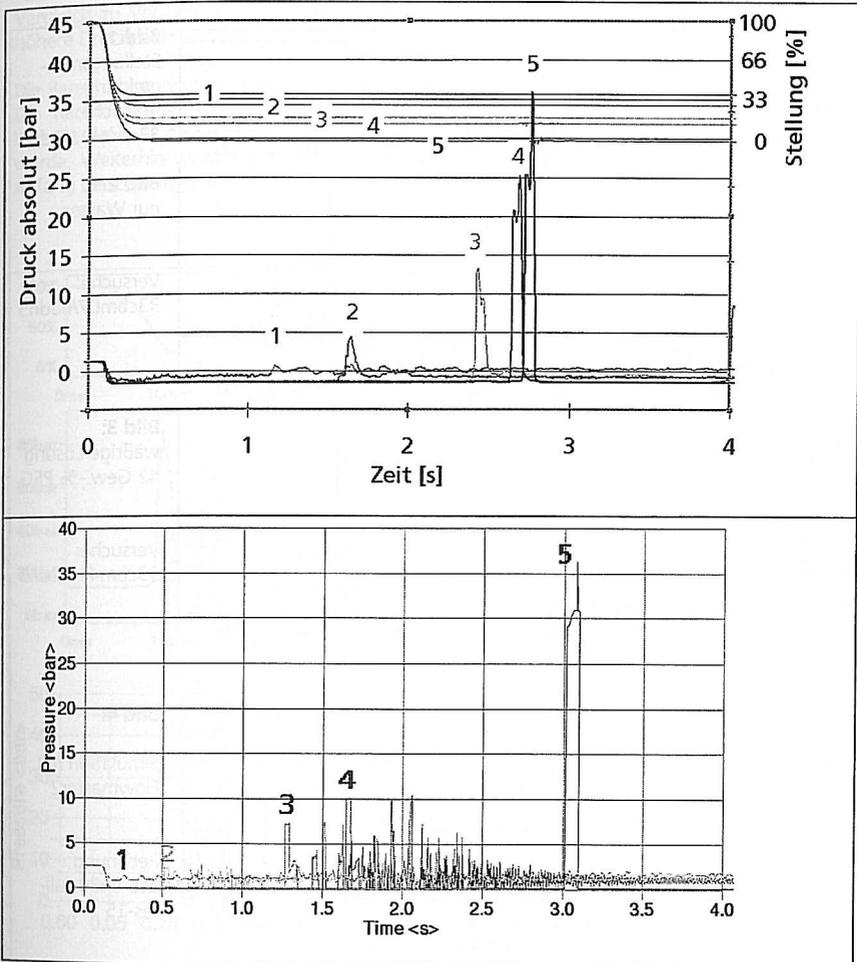


Abb. 6.9: Vergleich von Messung (oben) und Rechnung (unten) beim Teilschluß auf unterschiedliche Endstellungen

Einfluß der Viskosität

In Abb. 6.10 sind die zeitlichen Verläufe der Meßgrößen Armaturestellung (Bild 1) und Druck an der Position P03 (Bilder 2, 3) im Vergleich zur Rechnung (Bild 4) dargestellt. Die stationäre Flüssigkeitsgeschwindigkeit beträgt jeweils 4,0 m/s. Die Bilder 2 und 3 zeigen den Einfluß der Flüssigkeitsviskosität für jeweils zwei Versuche mit gleichen Randbedingungen. Im Vergleich zu Stadtwasser führen die Kavitationsschläge bei der viskosen Lösung (Bild 3) zu kleineren Druckamplituden (vgl. Kap. 5.2.10). Nach dem Wiederöffnen der Armatur (bei $t = 11$ s) werden jedoch erheblich höhere Kavitationsschläge erzeugt.

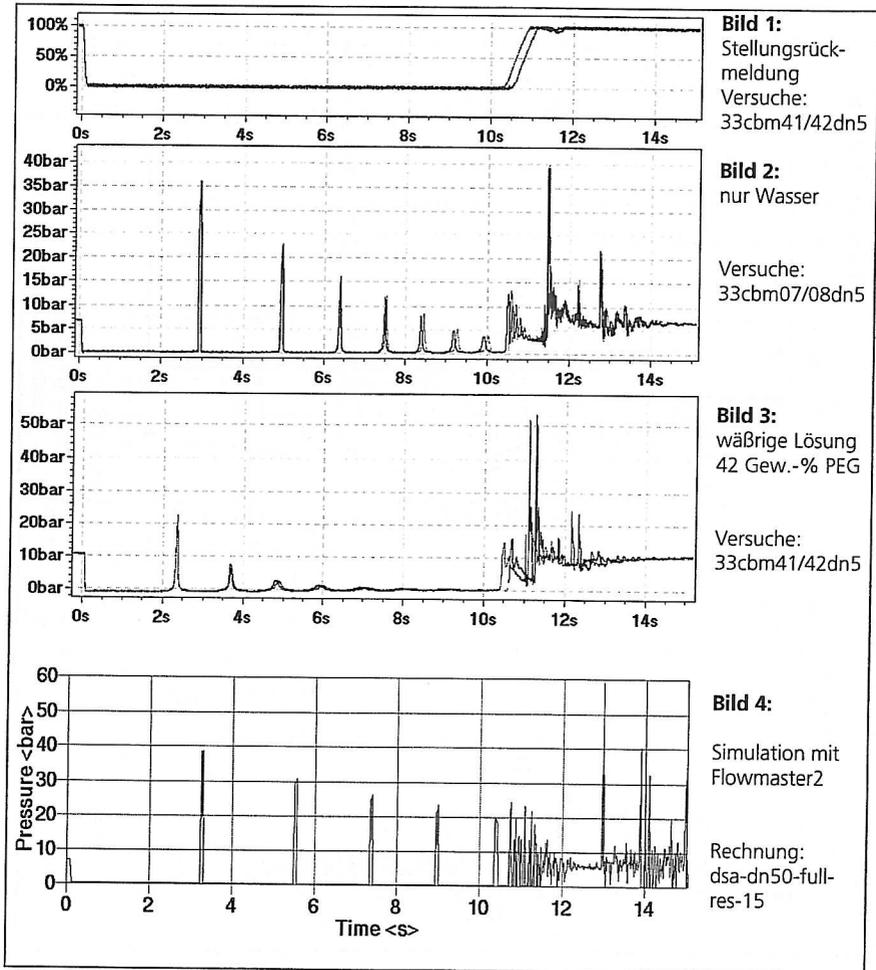


Abb. 6.10: Vergleich von Messung und Rechnung (unten) an der Position P03; Konzentration von PEG: 42 Gew.-%; Viskosität der Lösung: 46 mPas; $v_0 = 4,0$ m/s, $T = 20$ °C, $a = 1600$ m/s

Das Rechenergebnis (Bild 4) zeigt im Vergleich zu den Berechnungen mit Wasser an dieser Position eine größere Dämpfung der ersten Kavitationsschläge (vgl. Abb. 6.4). Die berechneten Amplituden sind im Vergleich zu den gemessenen doppelt so hoch. Der Kavitationsschlag infolge des Öffnungsvorgangs der Armatur wird jedoch deutlich niedriger vorhergesagt.

Für die Rechnung wurden die gemessenen Größen Viskosität, Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und spezifische Dichte der viskosen Lösung eingesetzt. In Abb. 6.11 sind die zeitlichen Verläufe derselben Versuche an der Position P02 dargestellt (Bilder 2, 3). Bild 1 stellt den zu Abb. 6.9, Bild 1, entsprechenden zeitlichen Ausschnitt der Stellungsrückmeldung dar. Im Vergleich zu Versuchen mit Stadtwasser (vgl. Abb. 6.8) werden bei der PEG-Lösung deutlich höhere Druckpeaks erhalten.

Die Berechnung zeigt, daß der erste Druckpeak ($t = 0,1$ s) deutlich kleiner vorausgesagt wird. Die nachfolgenden Druckpeaks werden gemäß Rechnung nicht gedämpft. Ein mögliche Ursache dafür ist gelöste Luft in der viskosen Lösung, die in der Rechnung nicht berücksichtigt wurde. Weiterhin wird anstelle einer Kreiselpumpe die Randbedingung konstanter Druck am Anfang der Leitung gesetzt.

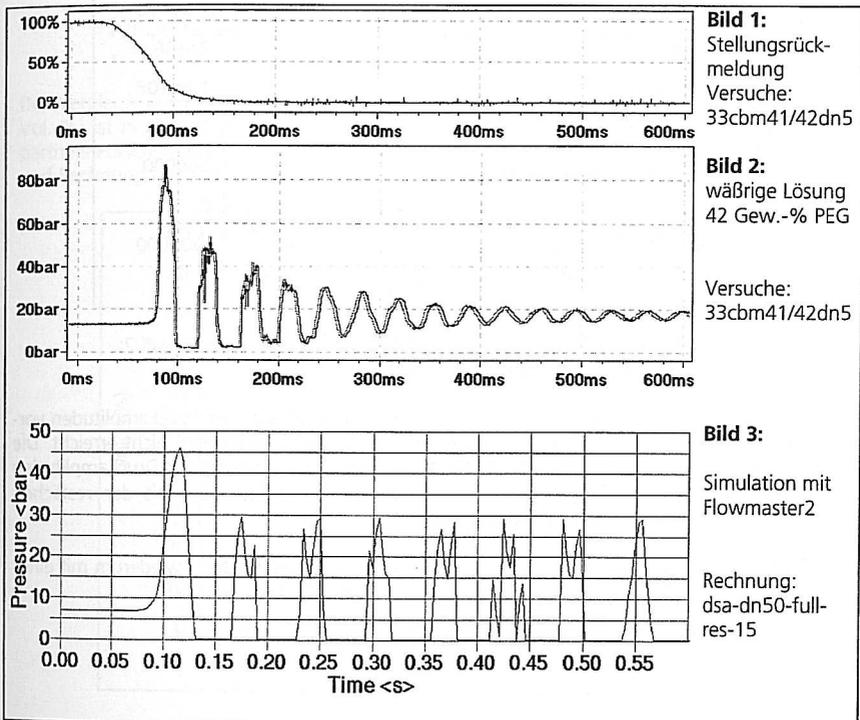


Abb. 6.11: Vergleich von Messung und Rechnung (unten) an der Position P02; Konzentration von PEG: 42 Gew.-%; Viskosität der Lösung: 46 mPas; $v_0 = 4,0$ m/s, $T = 20$ °C, $a = 1600$ m/s

6.1.3 Vergleichende Untersuchungen mit dem Rechencode MONA

Die Simulationen wurden unter den folgenden Annahmen durchgeführt (vgl. Kap. 6.1.2)

- Volumenanteil an Luft: 0,1 Vol.-%
- Rohrrauhigkeit: $k_r = 0,01$ mm
- Zeitschritte: $\leq 0,0002$ s
- keine Druckverluste an Rohrbögen
- adiabate Zustandsänderungen

Die Bezeichnungen der Meß- und Simulationspositionen beziehen sich auf Abb. 3.6. Das benutzte Netzwerk ist in Kap. 4.3.2 erläutert.

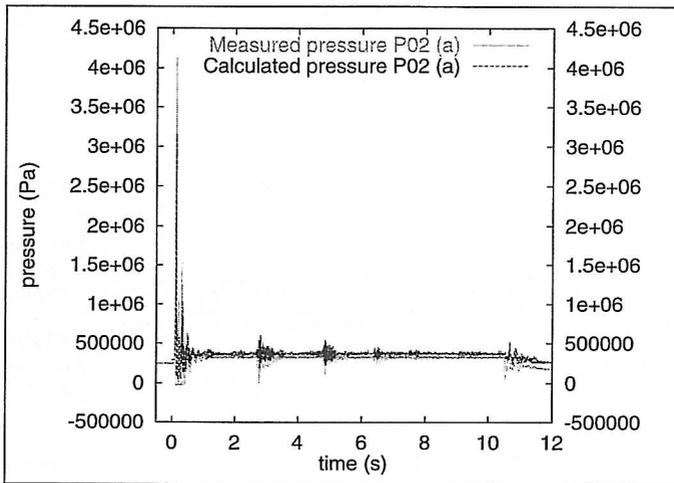


Abb. 6.12: Vergleich von Messung und Rechnung an der Meßstelle P02; $v_0 = 3,0$ m/s; (Versuch: 99cbm28, Simulation: MONA)

An der Meßstelle P02 werden vom Rechencode MONA ebenfalls kleinere Druckamplituden vorhergesagt (s. Abb. 6.12, schwarzer Kurvenverlauf). Dampfdruckniveau wird nicht erreicht. Die Annahme von im System befindlicher Luft führt zur schnellen Dämpfung der Druckamplituden ($0 \leq t \leq 1$ s). Die Dämpfung wird im Vergleich zu den Rechnungen mit der restlichen Projektsoftware erheblich besser wiedergegeben.

An der Meßposition P03 (s. Abb. 6.13) werden kleinere Druckamplituden, wiederum mit einer gut übereinstimmenden Dämpfung der Kavitationsschläge vorhergesagt.

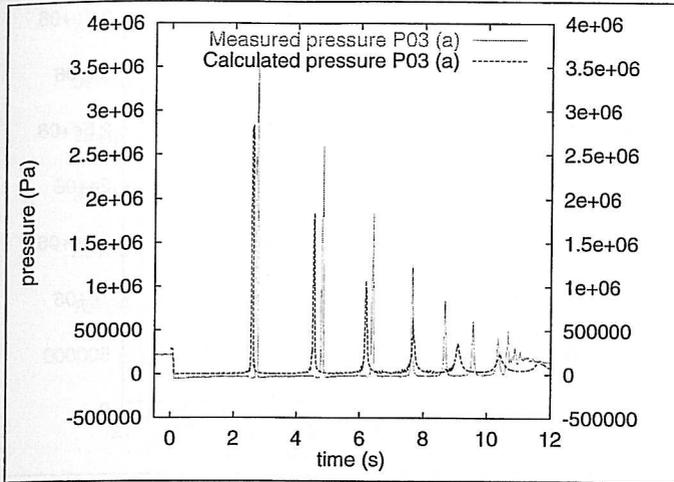


Abb. 6.13: Vergleich von Messung und Rechnung an der Meßstelle P03; $v_0 = 3,0$ m/s; (Versuch: 99cbm28, Simulation: MONA)

Der Vergleich des gemessenen mit dem berechneten zeitlichen Dampf / Luftgehalts (void, in Vol.-%) ist in Abb. 6.14 aufgetragen. Die Meßdaten wurden mit Gittersensoren des Projektpartners Forschungszentrum Rossendorf aufgenommen /PRAS98/. Der Vergleich von Messung und Rechnung mit dem Rechencode MONA zeigt eine gute Übereinstimmung.

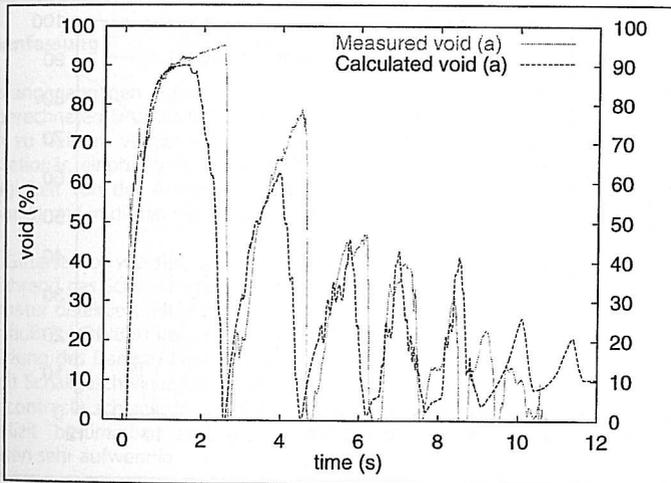


Abb. 6.14: Zeitlicher Verlauf des voids: Vergleich von Messung und Rechnung an der Meßstelle P03; $v_0 = 3,0$ m/s; (Versuch: 99cbm28, Simulation: MONA, Meßdaten: /PRAS98/)

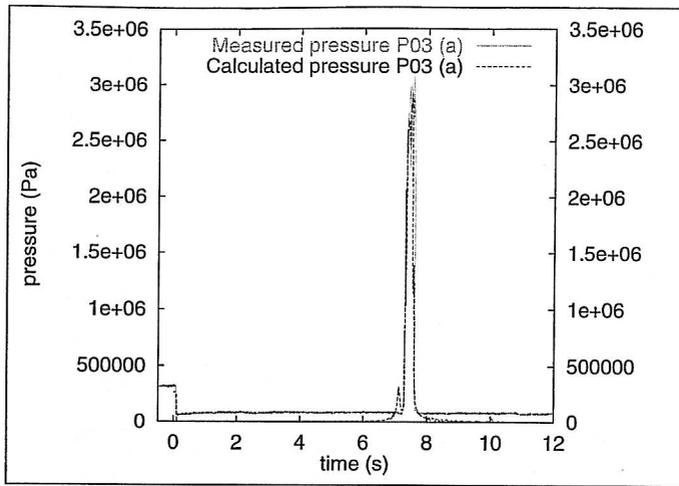


Abb. 6.15: Vergleich von Messung und Rechnung an der Meßstelle P03; $v_0 = 3,0$ m/s (Versuch: 99cbm45, Simulation: MONA); ohne Rohrbrücke

Bei den Versuchen ohne Rohrbrücke wurden ebenfalls eine gute Übereinstimmung von Meßdaten und Berechnung bezüglich des ersten Kavitationsschlages erzielt (s. Abb. 6.15). Der berechnete zeitliche Voidverlauf postuliert etwas kleinere Werte als der gemessene, jedoch wird der Zeitpunkt der Kondensation ($t = 7$ s) gut wiedergegeben (s. Abb. 6.16).

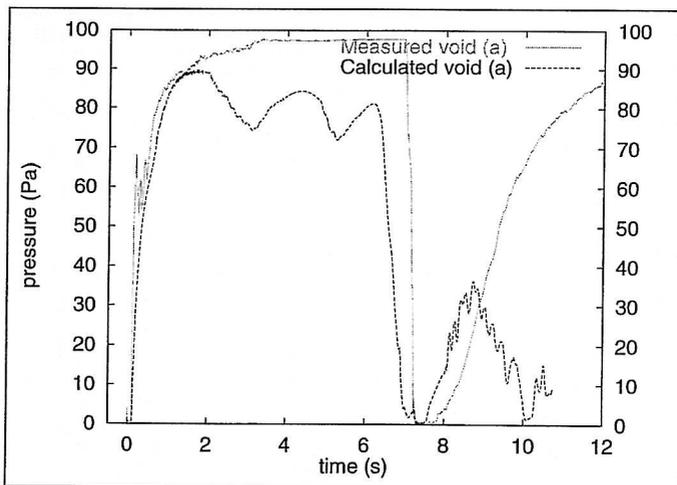


Abb. 6.16: Vergleich von Messung und Rechnung an der Meßstelle P03; $v_0 = 3,0$ m/s (Versuch: 99cbm45, Simulation: MONA); ohne Rohrbrücke

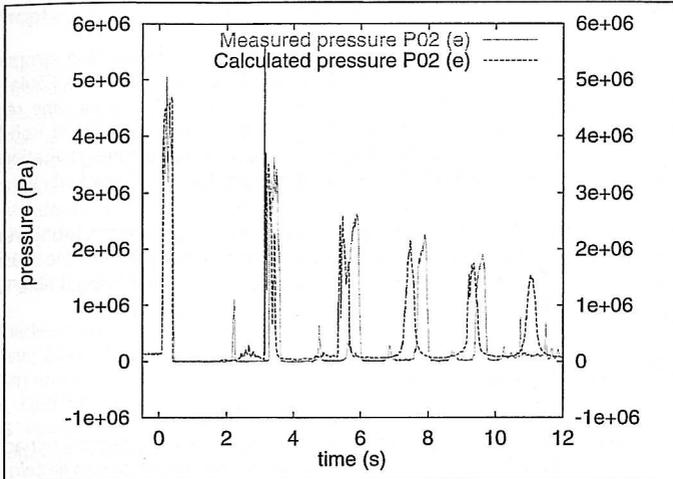


Abb. 6.17: Vergleich von Messung und Rechnung an der Meßstelle P03; $v_0 = 3,0$ m/s; (Versuch: 99cbm53, Simulation: MONA); Ventil an Pos. 2

Bei Einbau der Armatur an Position 2 erhält man ebenfalls eine recht gute Übereinstimmung von Meßdaten und Simulation (s. Abb. 6.17). Die durch Teilcondensationen hervorgerufenen Kavitationsschläge bei $t = 2, 4$ und 7 s werden nicht berechnet.

Zusammenfassung

Die im vorangegangenen Kapitel dargestellten Ergebnisse zum Armatureschnellschluß zeigen, daß die berechneten Druckspitzen stromaufwärts der Schließarmatur insbesondere bei kurzen Leitungen zu klein im Vergleich zu Meßdaten postuliert werden. Dies ist dadurch zu erklären, daß die stationär, einphasig ermittelte Druckverlustkennlinie der exzentrischen Klappe (k_v -Wert in Abhängigkeit von der Armaturenstellung) ist bei schnellen Schließvorgängen nur bedingt anwendbar ist und in diesen Fällen zu geringe Widerstandsbeiwerte voraussagt (vgl. Kap. 6.3).

Mit dem Gittersensor wurden, analog zum gemessenen Druckabfall an der Meßposition P03, bereits während des Schließvorgangs großräumige Dampfblasen unmittelbar stromabwärts der Schließarmatur detektiert /PRAS98/. Es wird nun angenommen, daß ähnlich wie beim stationären Durchfluß (s. /DIN89/) im engsten Strömungsquerschnitt der Armatur Kavitationsprozesse für die Bildung des Dampfblasen verantwortlich sind. Beim Schließen können diese Dampfblasen nur mit Schallgeschwindigkeit abströmen, so daß die Flüssigkeit unmittelbar stromaufwärts der vena contracta schlagartig abgebremst wird. Da die Parameter Rauigkeit und Keimzahl nicht explizit bestimmbar sind, ist die analytische Bestimmung des Volumens dieser Dampfblasen sehr aufwendig.

Für zukünftige Untersuchungen auf diesem Gebiet ist ein Modell zu entwickeln, mit dem eine verbesserte Berechnung unter Benutzung der im Projekt benutzten Software möglich ist.

Die Simulationen mit den eingesetzten PEG-Lösungen führten zu erheblichen Abweichungen im Vergleich zu den Meßdaten. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

6.1.4 Modell für die Ausdehnung der Kavitationsblase

Wie die experimentellen Untersuchungen zeigen /PRAS98-2/, kann für den stromabwärtigen Teil der Rohrleitung (hinter der Absperrarmatur) die Flüssigkeit als starre Säule betrachtet werden (vgl. auch /THOR91/). In einer horizontalen Leitung genügt sogar eine reibungsfreie Betrachtung der Flüssigkeitsdynamik. Nach dem Armaturenschluß hat sich im Rohrleitungsteil der Länge L stromabwärts der Armatur direkt hinter der Armatur eine Kavitationsblase der Länge x ausgebildet. In der Blase herrscht der Sättigungsdruck p_s der Flüssigkeit.

Mit diesen Annahmen und der Vereinfachung einer vertikal zur Strömungsrichtung verlaufenden Phasengrenze Dampf / Wasser (s. Abb. 5.29) lautet die Kräftebilanz für eine Flüssigkeit der Dichte ρ , die stationär mit der Geschwindigkeit v_0 von rechts nach links durch eine Rohrleitung mit dem Querschnitt A in ein Reservoir mit dem Systemdruck p_2 strömt:

$$\rho A L \frac{dv}{dt} = -(p_2 - p_s + \Delta p_R + \Delta p_h) A . \quad 6.1.1$$

Unter der Annahme, daß die reibungs- und hydrostatischen Druckdifferenzen vernachlässigbar sind, kann die momentane Geschwindigkeit und Länge der Kavitationsblase wie folgt ermittelt werden:

$$\frac{dx}{dt} = v = v_0 - t \frac{p_2 - p_s}{\rho L} , \quad 6.1.2$$

und

$$x = \int_0^t \left(\frac{dx}{dt} \right) \cdot dt' = v_0 t - \frac{t^2}{2} \frac{p_2 - p_s}{\rho L} . \quad 6.1.3$$

Die maximale Ausdehnung der Kavitationsblase (und somit der Mindestabstand x zwischen Absperrarmatur und Rückschlagklappe) errechnet sich mit $t^* = t(v = 0)$ zu

$$x_{\max} = \frac{v_0^2}{2} \frac{\rho L}{p_2 - p_s} . \quad 6.1.4$$

6.2 Modellentwicklung zum Einströmen von Luft in eine leere und teilgefüllte Rohrleitung

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 (Leitungsgeometrie, Anfangsdruck und Menge an vorgelegtem Wasser).

6.2.1 Pfropfengeschwindigkeiten

Aus den Abständen der Meßpositionen und den gemessenen zeitlichen Druckverläufen kann die Geschwindigkeit des Pfropfens bestimmt werden. In Abb. 6.18 sind die maximalen Pfropfengeschwindigkeiten für verschiedene Behältervordrücke dargestellt. 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 Wasser von 49 l 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.

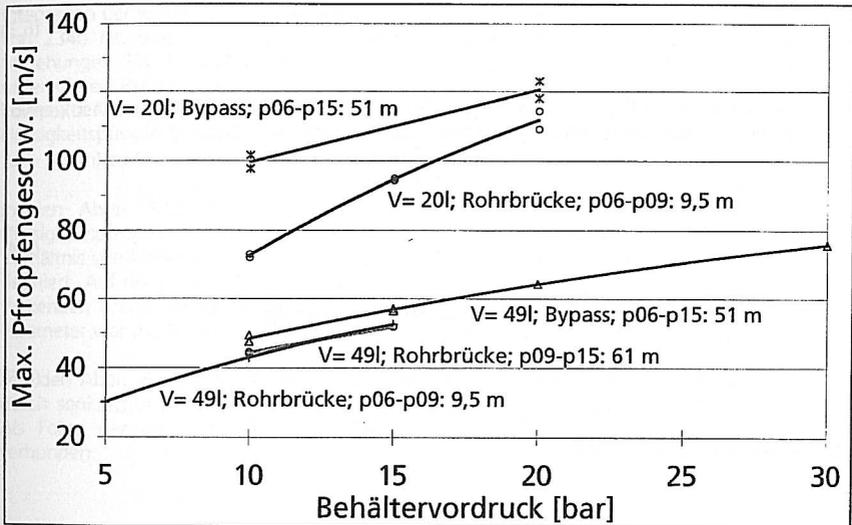


Abb. 6.18: Maximale Pfropfengeschwindigkeit zwischen unterschiedlichen Meßstellen in Abhängigkeit vom Behältervordruck, Parameter: vorgelegtes Wasservolumen, Rohrleitungsgeometrie

6.2.2 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 des Pfropfens zwischen den Meßpositionen,
- 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.

$$I = m \cdot v \quad (6.1)$$

Der Impuls I ändert sich unter dem Einfluß einer Kraft F gemäß

$$F = \frac{dI}{dt} \quad (6.2)$$

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

$$\int_{t_1}^{t_2} F(t) dt = \int_{I_1}^{I_2} dI = I_2 - I_1 \quad (6.3)$$

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

$$m = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F(t) dt}{v} \quad (6.4)$$

Mit der Rohrleitungsgeometrie und der Dichte der Flüssigkeit folgt

$$L_p = \frac{4 \cdot m}{d^2 \cdot \rho \cdot \pi} \quad (6.5)$$

für die wirkende Länge des Pfropfens.

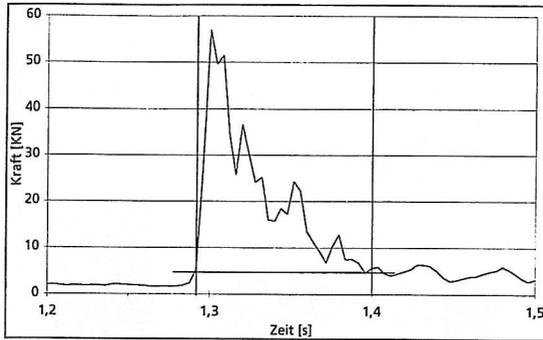


Abb. 6.19: Kraft in x-Richtung durch Umlenkung der Flüssigkeit am ersten Rohrbogen der Rohrbrücke, gemessen am vorderen Kraftaufnehmer (FP1); (Versuch: 15ba17d1, Wasservorlage: 49 l an Vertiefung 1, Behälervordruck: 15 bar)

In Abb. 6.19 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 Festpunkt 1 (FP1) gemessen. Hierbei überwiegt die Axialkraft.

Gemäß Abb. 6.19 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 den Beziehungen Gln. 6.3 und 6.4 eine effektive Flüssigkeitsmasse von 44,5 kg. Das bedeutet, daß unter diesen Bedingungen ca. 90% der am Tiefpunkt vorhandenen Wassermenge (49 l) als kompakte Flüssigkeitsmasse einen Impuls auf eine Umlenkung ausübt. 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. 3.7).

In den Abbn. 6.20 und 6.21 sind auf der linken Achse die effektiven Massen der Flüssigkeitspfropfen als Pfropfenanteil aufgetragen. Der Pfropfenanteil wird hierbei als Verhältnis von effektiver, d.h. kraftauslösender Flüssigkeitsmasse 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. 6.20 mit Rohrbrücke, Abb. 6.21 ohne Rohrbrücke)

Aus den Abbn. 6.20 und 6.21 wird ersichtlich, daß mit zunehmendem Behälervordruck und durch senkrechte Leitungsabschnitte die Bildung eines Flüssigkeitspfropfens begünstigt wird. Als Folge der größeren wirkenden Masse ist somit auch eine Vergrößerung der Kraft verbunden.

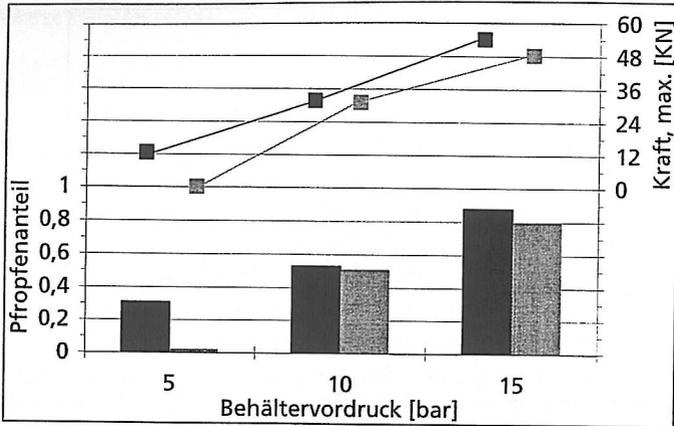


Abb. 6.20: Pfropfenanteil an der Rohrbrücke mit Maximalkraft am Festpunkt FP1 (schwarz) / Pfropfenanteil am Wendepunkt FP2 mit Maximalkraft (grau) in Abhängigkeit vom Behältervordruck; *mit* Rohrbrücke

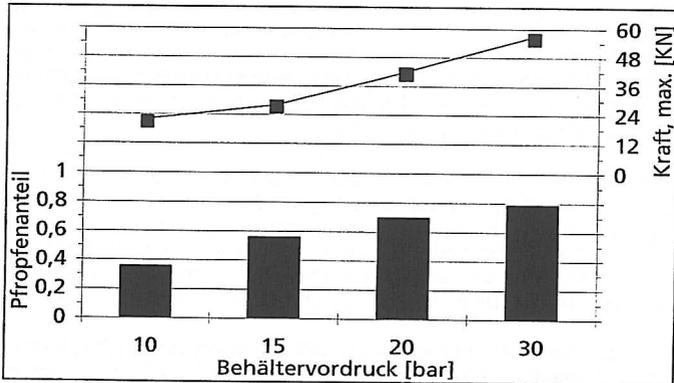


Abb. 6.21: Pfropfenanteil mit Maximalkraft am Wendepunkt (FP2) in Abhängigkeit vom Behältervordruck, *ohne* Rohrbrücke

6.2.4 Modellierung der gasinduzierten Flüssigkeitsbewegung in Gasleitungen

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.

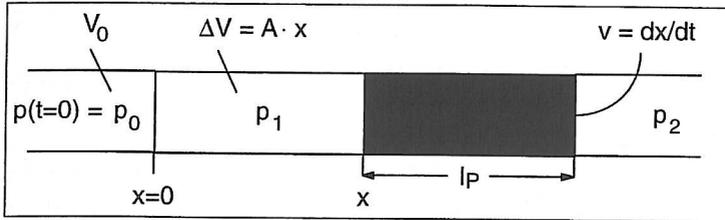


Abb. 6.22: Schematisch, modellhafte Darstellung des Pfropfens in der Rohrleitung

Als Modellvoraussetzungen werden angenommen

- Der Pfropfen nimmt während des Vorgangs immer die gesamte Rohrquerschnittsfläche ein und behalte die konstante Pfropfenlänge L_p ,
- Die Gasmasse vor dem Pfropfen bleibt konstant,
- Die Rohrleitung ist einsträngig und verläuft horizontal,
- Der Gegendruck p_2 bleibt während des Vorganges konstant. (keine Reibung des verdrängten Gases),
- Die Zustandsänderung im Gasraum verlaufe adiabatisch mit $p \cdot V^\chi = \text{const.}$,
- Für die Rohrreibung des Pfropfens gelte das Widerstandsgesetz von MILLER. Der Widerstandsbeiwert für das Gas ist im untersuchten Druck-, Temperatur- und Geschwindigkeitsbereich konstant mit $\zeta_G = 0,015$ (s. Tab. 6.1).

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

Tab. 6.1: Versuchsbedingungen

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

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

Die Kräftebilanz um den Pfropfen liefert

$$F = (p_1 - p_2) \cdot A - (\tau_L \cdot \pi \cdot d \cdot L_p) - (\tau_G \cdot \pi \cdot d \cdot x) \quad (6.7)$$

Mit den Wandschubspannungen für Gas und Flüssigkeit

$$\tau_G = \frac{1}{8} \cdot \zeta_G \cdot \rho \cdot v^2 \quad \text{bzw.} \quad \tau_L = \frac{1}{8} \cdot \zeta_L \cdot \rho \cdot v^2 \quad (6.8)$$

ergibt sich

$$F = A \left[(p_1 - p_2) - \left(\zeta_L \cdot \frac{L_p}{2 \cdot d} \cdot \rho_L \cdot v^2 \right) - \left(\zeta_G \cdot \frac{x}{2 \cdot d} \cdot \rho_G \cdot v^2 \right) \right]. \quad (6.9)$$

Bei einer adiabaten Zustandsänderung im Gasraum vor dem Pfropfen gilt

$$\frac{p_1}{p_0} = \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^\chi, \quad (6.10)$$

womit sich für das Gasvolumen ergibt:

$$V_1 = V_0 + A \cdot x \quad \rightarrow \quad \frac{V_0}{V_1} = \frac{V_0}{V_0 + A \cdot x} = \left(1 + \frac{A \cdot x}{V_0} \right)^{-1}. \quad (6.11)$$

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

$$p_1 = \alpha \cdot p_0. \quad (6.12)$$

Man erhält die Beschleunigung des Pfropfens zu

$$a = \frac{F}{m} = \frac{F}{\rho_L \cdot L_p \cdot A} = \frac{(p_0 \cdot \alpha - p_2)}{\rho_L \cdot L_p} - \zeta_L \cdot \frac{v^2}{2 \cdot d} - \zeta_G \cdot \frac{x \cdot \rho_G \cdot v^2}{2 \cdot d \cdot \rho_L \cdot L_p}. \quad (6.13)$$

Mit einer sich verändernden Dichte des Gasraums gemäß

$$\rho_G = \frac{m_G}{V} = \frac{m_{G0}}{V} = \frac{\rho_{G0} \cdot V_0}{V_0 + A \cdot x}, \quad (6.14)$$

erhält man für die Beschleunigung des Pfropfens

$$a = \frac{(p_0 \cdot \alpha - p_2)}{\rho_L \cdot L_p} - \frac{v^2}{2 \cdot d} \left[\zeta_L + (\zeta_G \cdot x) \cdot \left(\frac{V_0}{V_0 + A \cdot x} \cdot \frac{\rho_{G0}}{\rho_L \cdot L_p} \right) \right] \quad (6.15)$$

Somit lassen sich die Differentialgleichungen für die zurückgelegte Strecke und Zeit des Pfropfens in der Rohrleitung ableiten:

$$\frac{dv}{dx} = \frac{(p_0 \cdot \alpha - p_2)}{v \cdot \rho_L \cdot L_p} - \frac{v}{2 \cdot d} \left[\zeta_L + (\zeta_G \cdot x) \cdot \left(\frac{V_0}{V_0 + A \cdot x} \cdot \frac{\rho_{G0}}{\rho_L \cdot L_p} \right) \right] \quad \text{bzw.} \quad (6.16)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(p_0 \cdot \alpha - p_2)}{\rho_L \cdot L_p} - \frac{v^2}{2 \cdot d} \left[\zeta_L + (\zeta_G \cdot x) \cdot \left(\frac{V_0}{V_0 + A \cdot x} \cdot \frac{\rho_{G0}}{\rho_L \cdot L_p} \right) \right]$$

Der Rohrreibungskoeffizient der Flüssigkeit kann mit folgender Gleichung berechnet werden /MILL90/

$$\zeta_L = \frac{0,25}{\left(\log_{10} \left(\frac{k_r}{3,7 \cdot d} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right)^2} \quad \text{und} \quad \zeta_G = 0,015. \quad (6.17)$$

Dabei gilt für die Rohrrauigkeit $k_r \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}$.

Bei den experimentellen Versuchen im Rohrleitungssystem wurden Pfropfengeschwindigkeiten von weit über 30 m/s gemessen. Unter Berücksichtigung dieser Versuchsparameter ist es zulässig, ζ_G gemäß Gl. 6.17 vereinfachend als konstant zu setzen ($\zeta_G = 0,015$ bei $k/d = 0,0003$).

In Abb. 6.23 sind die mit Gl. 6.12 berechneten Druckverläufe mit den in der Versuchsanlage ermittelten zeitlichen Druckverläufen vergleichend dargestellt. Die gestrichelten Kurvenverläufe in Abb. 6.23 stellen den berechneten Druckverlauf des Pfropfens mit einer Länge von 5,32 m dar. Wie aus der Abbildung zu entnehmen ist, werden die Meßwerte vom Modell 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 Druckaufbau im Gasraum vor dem Pfropfen wird nicht berücksichtigt,
- der Flüssigkeitspfropfen wird von einer Zweiphasenströmung flankiert, die einen höheren Druckverlust als die reine Gasströmung besitzt.

Eine detailliertere meßtechnische Untersuchung der Strömungsphänomene und eine Erweiterung der Versuchsparameter, insbesondere hinsichtlich geometrischer Faktoren, sollten Ziel weiterer Untersuchungen sein.

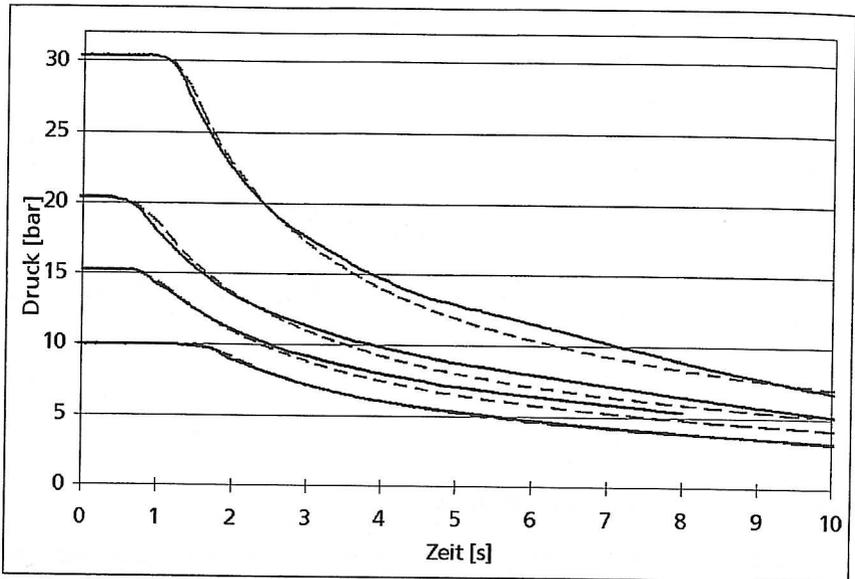


Abb. 6.23: Gemessener und berechneter zeitlicher Druckverlauf in Abhängigkeit vom Behältervordruck P24; vorgelegte Wassermenge: 49 l; Propfenlänge: 5,32 m durchgezogene Kurven: gemessen; gestrichelte Kurvenverläufe: berechnet

6.3 Druckstoßberechnung mit Hilfe von instationären Armaturen Kennlinien

Ein wesentlicher Schwachpunkt bei der dynamischen Berechnung von schnellen Regel- und Absperrvorgängen ist der Gebrauch von stationär ermittelten *Armaturen Kennlinien* (Widerstands- bzw. Durchfluß-Beiwerte - ξ bzw. k_v - in Abhängigkeit von der Armaturenöffnung). Bei schnellen Schließvorgängen muß beachtet werden, daß aufgrund von Verdampfungsvorgängen in der Armatur die tatsächlichen Strömungswiderstände weitaus höher sein können als die vom Hersteller nach DIN IEC 534 (DIN89) stationär ermittelten Daten, insbesondere bei schnellen Schließzeiten, niedrigem Systemdruck und kurzen Rohrleitungen (z.B. für Wasser bei 20 °C: Schließzeit: <0,5 s; Druck: < 10 bar, Leitungslänge stromaufwärts der Schließarmatur: < 50 m).

Vorgehensweise

Der zeitliche Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit wird mit einem schnellen Ultraschallmeßgerät ermittelt, welches üblicherweise für schnelle Materialprüfvorgänge (z.B. bei Tauchprozessen) benutzt wird. Weiterhin wurden der zeitliche Verlauf der Armaturenstellung und des Drucks unmittelbar stromaufwärts der sich schließenden Armatur ermittelt. Man erhält für eine exzentrische, metallisch dichte Klappe der Nennweite DN100 den in Abb. 6.24 gezeigten Verlauf.

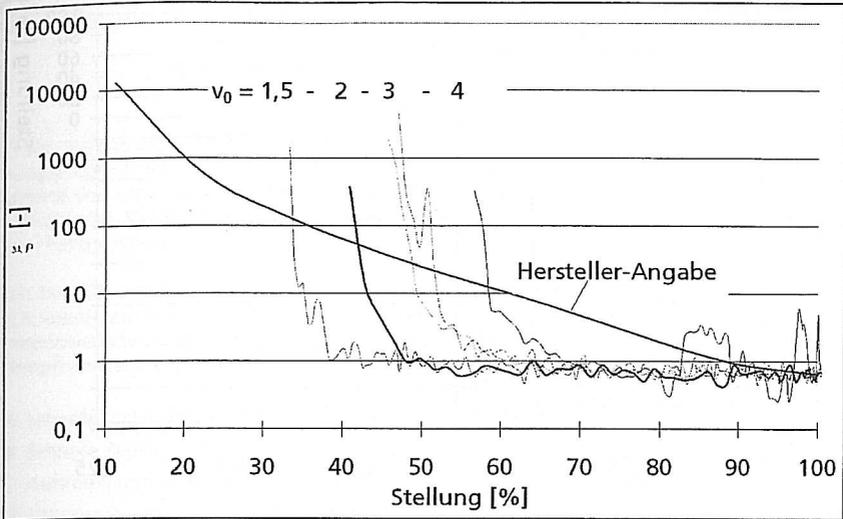


Abb.6.24: Vergleich der stationären (Herstellerangabe) mit den unter dynamischen Bedingungen ermittelten Klappenkennlinien einer exzentrischen Absperrklappe der Nennweite DN100 (Parameter: Stationäre Flüssigkeitgeschwindigkeit: 1,5 - 4 m/s, Systemdruck: 1,5 - 3,8 bar)

Man erkennt, daß die - bei gleicher Schließgeschwindigkeit der Klappe - aus Druck-, Stellungs- und Durchflußsignal ermittelten dynamischen Kennlinien von der stationären Strömungsgeschwindigkeit abhängig sind. Die Schwankungen der dynamischen Kennlinien sind auf Luft- und Dampfanteile im Medium zurückzuführen. Zum Zwecke der Reproduzierbarkeit sind für die stationäre Flüssigkeitgeschwindigkeit von 3 m/s die Ergebnisse zweier Versuche dargestellt.

Auswirkung auf die dynamische Druckberechnung

Die experimentell ermittelten Kennlinien können nun direkt in Berechnungsprogramme eingesetzt werden. Man erhält für eine stationäre Strömungsgeschwindigkeit von 3,0 m/s den in Abb. 6.25 gezeigten Druck-Zeit-Verlauf. Auf der rechten Ordinate ist der gemessene zeitliche Verlauf der Armaturenstellung dargestellt. Die Armatur schließt, ausgehend vom vollständig geöffneten Anfangszustand. Dabei wird stromaufwärts der gemessene Druckanstieg mit einem Maximalwert von ca. 42 bar (bei $t = 0,10$ s) detektiert (linke Ordinate).

Die fluiddynamische Berechnung mit der Hersteller-Charakteristik ergibt ein Maximum von 30 bar (bei $t = 0,12$ s). Unter Benutzung der geglätteten, dynamischen Kennlinie (vgl. Abb. 6.24, $v = 3$ m/s) erhält man eine weitaus bessere Übereinstimmung von Messung und Rechnung. Der Druckabfall wird aufgrund der Vereinfachungen

- gerade Rohrleitung statt Eingabe der tatsächlichen Isometrie und
- Vernachlässigung der Fluid-Struktur-Wechselwirkungen)

mit einer zeitlichen Verzögerung wiedergegeben.

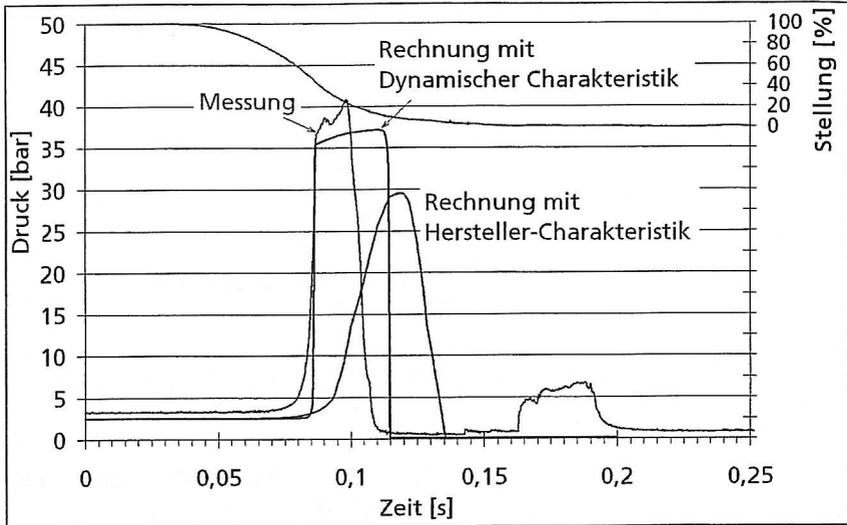


Abb. 6.25: Messung der Klappenstellung (rechte Skala) und des Drucks (linke Skala) in Abhängigkeit von der Zeit; Berechnung des zeitlichen Druckverlaufs mit Hersteller- und gemessener dynamischer Klappencharakteristik gemäß Abb. 1. (Anfangszustand: stationäre Flüssigkeitsgeschwindigkeit: $v_0 = 4 \text{ m/s}$, Systemdruck: 2,7 bar)

Anwendung dynamischer Armaturencharakteristiken

Eine exakte Wiedergabe der Auswirkungen von Druckwellen in Rohrleitungen (Schwingung der Leitung, Kraftwirkung auf Unterstüzungen, Innendruckbelastung des Rohrmaterials) ist aufwendig und nicht immer erforderlich. Für die Schadensanalyse oder für eine grobe Auslegung des Systems genügen häufig vereinfachende Annahmen (Vernachlässigung der Fluid-Struktur-Wechselwirkungen, Abschätzung der Druckpeaks nach Joukowsky (Gl. 4.1), lineare Dämpfungseigenschaften der Struktur). Treten jedoch spezielle Details der Anlagensicherheit oder wirtschaftliche Optimierung der Betriebsweise in den Vordergrund, so gewinnt eine detaillierte Berechnung an Bedeutung. Ein befriedigendes Rechenergebnis erhält man nur bei Kenntnis aller folgenden Einflußgrößen:

- Isometrie (der Rohrleitung und deren Unterstüzung),
- Stoffeigenschaften (Dichte, Elastizität von Medium, Rohr- und Rohrauflagematerial, im Kraftwerksbau auch Kondensations- und Verdampfungskinetik),
- Strömungswiderstände (Rauigkeiten, Fittings, Kennlinien der Regel- und Absperrarmaturen).

Die Ermittlung dynamischer Armaturenkenlinien ist aufgrund der - im Vergleich zu stationär ermittelten Kennlinien - zusätzlichen Abhängigkeit von der Schließgeschwindigkeit der Armatur und vom stationären Durchsatz aufwendig und erfordert einen vergleichsweise hohen meßtechnischen Aufwand.

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die Vorhersagen von ausgewählten, kommerziellen *Berechnungsprogrammen* zur Beschreibung von transienten Strömungsvorgängen in Rohrleitungen anhand von *experimentellen Untersuchungen* vergleichend bewertet. Beschrieben werden die auftretenden Strömungsformen sowie die zeitlichen und örtlichen Verläufe des Systemdrucks, der Phasenvolumina und des Kraftertrags in Festpunkten.

Mit besonderem Schwerpunkt werden Prozesse in Rohrleitungen untersucht, wobei - infolge von Regel- und Steuereingriffen - nach anfänglich einphasiger Flüssigkeits- oder Gasströmung unterschiedliche zweiphasige Strömungszustände (Wasser - Gas bzw. Wasser - Gas/Wasserdampf) entstehen. Dies ist u.a. bei den folgenden praxisrelevanten *Szenarien* der Fall:

- A Schnelles Schließen und Öffnen von Armaturen in flüssigkeitsfördernden Leitungen
- B Schnelle Regelvorgänge von Armaturen in flüssigkeitsfördernden Leitungen
- C Auftreten und Verhinderung von Druckstößen und Kavitationsschlägen
- D Einströmen von Gas und Flüssigkeit in leere Leitungen
- E Einströmen von Gas in teilgefüllte Rohrleitungen

Diese Szenarien wurden an einer Versuchsanlage am Oberhausener Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT gestellt und untersucht. Die experimentellen Randbedingungen wurden aus der einschlägigen Fachliteratur und aus Gesprächen und Diskussionen aktueller Problemstellungen mit Industriefachleuten aus den Branchen Chemie, Öl und Gas, Fernwärme und Kraftwerksbau festgelegt.

Mit Hilfe innovativer Meßverfahren, insbesondere von Leitfähigkeits-Gittersensoren, einer Hochgeschwindigkeitskamera und einem schnellen Ultraschall-Durchflußmeßgerät, wird eine umfassende Diagnose o.g. Transportprozesse in Rohrleitungssystemen durchgeführt. Die Versuchsdaten der Druck-, Kraft- und Phasenanteil-Messungen werden mit einem transienten Aufzeichnungssystem dokumentiert und für im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte sowie zukünftige Simulationsrechnungen aufbereitet.

Mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen werden die in der Industrie eingesetzten Berechnungsprogramme WANDA, PIPENET, SIR-3S, FLOWMASTER, FLUSTRIN und MONA vergleichend bewertet. Unter den Kriterien

- der wissenschaftlich-technischen Modellgüte,
- der sicherheitsgerechten Vorhersage sowie
- des wirtschaftlichen Betriebs von Rohrleitungssystemen

kann festgestellt werden, daß die experimentell gestellten Szenarien gut bis befriedigend von der Projektsoftware mit untereinander nur geringen Abweichungen zu simulieren sind.

Dies gilt insbesondere für das in den Programmen WANDA, PIPENET, SIR-3S und FLOWMASTER benutzte einfache *Kavitationsmodell* KoDaKav, mit dem die im Projekt experimentell untersuchten Szenarien mit unterkühlter Flüssigkeit unter dem Aspekt der sicherheitsgerechten Auslegung von Rohrleitungen gut wiedergegeben werden können.

Folgende *Einschränkungen* sind zu beachten:

- 1 Die experimentell untersuchten Einströmvorgänge (Szenarien 4 und 5) sind nicht von allen Programmen berechenbar.
- 2 Der Rechencode FLUSTRIN in der vorliegenden Version ist für o.g. Szenarien beim Auftreten großräumiger Kavitationsblasen nicht anwendbar, da kein Kavitationsmodell implementiert ist.
- 3 Kavitationsphänomene von längerer Dauer können nicht befriedigend berechnet werden, da die im Vergleich zur Verdampfung langsameren Ausgasungsprozesse nicht berücksichtigt werden. Es werden eine zu geringe Dämpfung und eine Verschiebung der Periode der Kavitationsschläge zu größeren Zeitwerten berechnet.
- 4 Die experimentellen Ergebnisse zu den Szenarien 1 und 2 zeigen, daß die in den Programmen benutzten, vom Hersteller gemäß gültiger Normen einphasig und stationär ermittelten Armaturenkenlinien für transiente Strömungsvorgänge teilweise zu *nicht konservativen* Simulationsergebnissen führen.
- 5 Die Simulationen mit den höherviskosen PEG-Lösungen führen teilweise zu großen Abweichungen von den Meßergebnissen.

Um die mit der Verwendung stationärer Kennlinien verbundenen Probleme zu überwinden, wird ein neues Meßverfahren zur Erfassung von Armaturencharakteristiken bei schnellen Stellvorgängen in Flüssigkeiten entwickelt. Hierbei werden der Druck, der Durchfluß und die Armaturenöffnung beim Schließvorgang *transient* erfaßt und mit diesen Daten eine *dynamische Kennlinie* ermittelt (Durchflußbeiwerte (k_v) bzw. Widerstandsbeiwerte (ξ) als Funktion des Öffnungsgrades der Armatur). Die so erhaltene Charakteristik ist abhängig vom Systemdruck, vom Durchsatz und von der Schließgeschwindigkeit.

Die mit diesem Verfahren ermittelten Charakteristiken weichen deutlich von den stationär ermittelten Herstellerangaben ab, führen jedoch mit den untersuchten Simulationsprogrammen zu erheblich besseren Voraussagen im Druck-Zeit-Verlauf.

Im Rahmen des Szenarios C wird eine innovative Anordnung zur Vermeidung von Kavitationsschlägen in flüssigkeitstransportierenden Rohrleitungen vorgestellt. Bei dieser Anordnung wird stromabwärts der Absperrarmatur eine Rückschlagarmatur in die Transportleitung eingebaut. Diese Hilfsarmatur sperrt die zwischen den beiden Armaturen gebildete Dampfblase ein und verhindert das Rückströmen des Transportmediums und somit den durch Kondensation entstehenden *Kavitationsschlag*. Die optimale axiale Einbauposition wird mit einem einfachen Modellansatz abgeschätzt.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen zu dieser Aufgabenstellung zeigen, daß die Kavitationsschläge in Abhängigkeit von der Leitungsgeometrie und unter der Voraussetzung des langsamen Wiederöffnens der Absperrarmatur nahezu vollständig vermieden werden können.

Die experimentellen Untersuchungen zum Einströmen von Gas in teilgefüllte Rohrleitungen (Szenario E) zeigen, daß durch die entstehende Gas/Flüssigkeitsströmung erhebliche Lasten in Umlenkungen und Festpunkte übertragen werden können, die in der Literatur bisher nicht dokumentiert sind. Aufgrund der eingeschränkten Berechnungsmöglichkeiten mit der Berechnungssoftware wird ein eigenes, einphasiges Modell auf Basis der Impulserhaltung entwickelt, das eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsdaten aufweist.

8 Literaturverzeichnis

- /BHRA96/ International Conferences on
Pressure Surges and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels,
BHR Group Conference Series, 1973 - 1996
- /BJOR84/ R. W. Bjorge, P. Griffith:
Initiation of Waterhammer in Horizontal and Near Horizontal Pipes Containing
Steam and Subcooled Water,
J. Heat Transfer 106 (1984), 835-840
- /DIN89/ DIN IEC 534, Teil 2-1:
Stellventile für die Prozeßregelung, Durchflußkapazität;
1989
- /DRIE99/ Drießen, W.:
Dynamische Strukturberechnung unter Berücksichtigung nichtlinearen
Lagerverhaltens,
Rohrleitungen in Kraftwerken und chemischen Anlagen - Rohrfernleitungen, 14.
Rohrleitungstechnische Tagung, Vulkan-Verlag Essen, 1999
- /DUDL97/ Dudlik, A.; Schlüter, S.; Prasser, H.-M.:
Transiente Strömungen in Rohrleitungen,
in: VDI-Bericht Nr. 1359; VDI-Verlag, 1997
- /ENKE97/ Enkel, P.; Grams, J.:
Druckstoßanalysen unter Berücksichtigung der Fluid-Struktur-Wechselwirkungen,
3R international Nr. 8, 36 (1997); 446-451
- /ERAT98/ Erath, W.; Nowotny, B.; Maetz, J.:
Simultane Kopplung der Berechnung von Druckstoßvorgängen mit der
Rohrleitungsschwingung,
3R international 08 1998 (37), S. 501-508
- /FLOW98/ FLOWMASTER 2 -Reference Help,
zu beziehen bei: AMSTRAL Engineering GmbH, Idstein b. Frankfurt, D, 1998
- /FLUS90/ FLUSTRIN Manual Version 1 - Theory,
delft hydraulics, delft, NL, 03/1990
- /HOEC82/ Polyglykole Hoechst,
Hoechst AG, Verkauf Organische Chemikalien G, Frankfurt/Main
- /HORL92/ H.-B. Horlacher, H.-J. Lüdecke:
Strömungsberechnung für Rohrsysteme,
expert Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1992
- /HOYE95/ Hoyer, Norbert:
Basic Validation of the transient two-phase flow model MONA,
SKI Report 95:16 ISSN 1104-1374, 1995

- /KLING/ Klingebiel, F.; Prosser, M.; Kahlstorf, U.:
Berechnung kompressibler Strömungen in Rohrleitungen,
in: Rohrleitungstechnik, 6. Ausgabe, Vulkan-Verlag, ISBN 3-8027-2705-3, S. 14
- /KRAS79/ Krass, W.; Kittel, A.; Uhde, A.:
Pipelinetchnik
Verlag TÜV Rheinland GmbH Köln, 1979, S. 215-216
- /MILL90/ Miller, D. S.:
Internal Flow Systems;
2nd Edition; BHRA, Cranfield, Bedford, 1990
- /PERK85/ Perko, H.-D.:
Gasausscheidung in instationärer Rohrströmung,
Institut für Stömungsmechanik und Elektronischen Rechnen im Bauwesen der
Universität Hannover, Bericht Nr. 16/1985
- /PIPE96/ PIPENET User Manual Transient Module,
Rev. 3.42 06/1996, Sunrise Systems Ltd, Waterbeach, Cambridge, UK
- /PRAN90/ Prandtl, L.: Führer durch die Strömungslehre,
9. Auflage; 1990 Vieweg Verlag, Braunschweig; S. 92-94
- /PRAS97/ 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
- /PRAS98/ 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
- /PRAS98-2/ Prasser, H.-M.; Dudlik, A.; Schlüter, S.:
Verhinderung des Kavitationsschlags beim schnellen Absperren einer
Flüssigkeitsleitung.
Beitrag zu: VDI/GVC - 4. Fachtagung Anlagen-, Arbeits- und Umweltsicherheit, 5.-
6. November, 1998, Köthen (to be published)
- /RASC94/ Raschke, E., Seelinger, A., Sperber, A., Straßburger, A.:
Simulation des instationären hydraulischen Verhaltens verfahrenstechnischer
Anlagen mit langen Rohrleitungen,
CIT 66 (1994) 5, S. 652-660.
- /RASC97/ Raschke, E.; Salla, M.; Hültenschmidt, W.:
Druckstoß gedämpft, Rohrleitung geschützt,
Verfahrenstechnik Nr. 7 - 8, 1997, S. 45 - 49
- /REIN 91/ Rein, Martin:
Numerische Untersuchung der Dynamik heterogener Stoßkavitation,
Selbstverlag des MPI für Strömungsforschung; 1991; Göttingen, D

- /SIMP 96/ Simpson, Angus R.; Bergant, Anton:
Interesting Lessons from Column Separation Experiments,
Proceedings of the 7th International Conference on Pressure Surges and Fluid
Transients in Pipelines and Open Channels;
BHR Group Limited; London, GB; 1996; Seiten 3-97
- /SCHI92/ E. Schiessle,
Sensortechnik und Meßwertaufnahme,
Vogelverlag, 1. Auflage 1992
- /SIR97/ SIR-3S Bedienungshandbuch 4F,
Version 5.0, 10/1997 3S Consult GmbH, Garbsen, D
- /SPER97/ Sperber, A.; Raschke, E.:
Kondensationsschläge in Rohrleitungen - Messungen an einer Versuchsanlage und
Simulationsmethoden,
3R International, 35, Nr.6, 1997
- /TIJS 90/ Tijsseling, A. S.; Lavooij, C. S. W.:
Waterhammer with Fluid-Structure Interaction,
Applied Scientific Research, 47, Nr. 3; 1990; Seite 273-285
- /THOR91/ Thorley, A. R. D.: Fluid Transients in Pipeline Systems,
D&L George LTD; 1991; Hadley Wood, Barnet, GB
- /VDI90/ VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien, Sicherheitsforschung und -
technik – Ein Förderkonzept des Bundesministers für Forschung und Technologie im
Rahmen des Programms „Umweltforschung und Umwelttechnologie“, BMFT
(Hrsg.), Düsseldorf 1990
- /WAND94/ WANDA User Manual,
Version 1 - delft hydraulics, delft, NL, 03/1994s
- /WYLI93/ E. B. Wylie, V. L. Streeter und L. Suo,
Fluid Transients in Systems,
Prentice Hall, Englewood Cliffs 1993
- /ZIEL 85/ Zielke, Werner; Perko Hans-Dieter:
Unterdruckerscheinungen und Druckstoßberechnung,
3R International, Jahrgang 24, Heft 7; 1985; Seite 348-355
- /ZUBK78/ N. G. Zubkova:
Characteristics of Water Hammer in Two-Phase Gas-Liquid Flows,
Hydrotechnical Construction 7(1978), 692-698

9 Anhang

Anhang 1 Versuche im Zeitraum Mai 1997 bis Januar 1998

Der Anhang 1 beinhaltet eine Auflistung der in den Monaten Mai 1997 bis Januar 1998 durchgeführten Versuche an der Versuchsanlage bei Fraunhofer UMSICHT zum Thema:

Armaturenschließb bei stationärer Flüssigkeits- und Gas/Flüssigkeitsströmung unter Variation des Armaturentyps, der Schließcharakteristik, der stationären Volumenströme an Luft und Wasser, der Anlagengeometrie sowie der Meßaufnehmer zur Überprüfung des Meßsystems.

Bemerkungen:

- Die Zahlenwerte für „disperse Luft“ bedeuten: eingespeister Anteil von Nm³/h Luft in m³/h Wasser. Es wurden mit Hilfe von Blindversuchen der volumetrische Anteil an kontinuierlich mitgeführter (also im Behälter nicht abgeschiedener) Luft erfäßt.
- Der Luftvolumenstrom wurde aus dem eingestellten Normvolumenstrom zuzüglich des Blindgehaltes in der Meßleitung bestimmt.
- „Bypass“ bedeutet: Ersatz der hinführenden Rohrleitung durch ein waagerechtes Rohrleitungsstück; der Hochpunkt im rücklaufenden Teil bleibt unverändert. Sind keine Angaben gemacht, so ist die Rohrbrücke implementiert.
- „Drossel“ bedeutet: Versuche mit variabler Schließzeit werden mit Hilfe einer Abluftdrossel realisiert. Der aus dem pneumatischen Antrieb entweichende Luftstrom wird unterschiedlich stark gedrosselt.
- Sind Gittersensordaten („wire mesh“ oder GS) vorhanden, ist die Datums-Spalte der Versuche grau markiert. Im Versuchszeitraum 07.07 und 08.07.1997 sowie 05.08. bis 12.08.1997 sind nur .p- und .v-files vorhanden.
- Kurstige Filenames bedeuten: gut kalibrierte GS-Daten; länger gestrichelte Filenames bedeuten: GS-Daten sind nicht tauglich.
- Graue Unterlegung der Filenames bedeutet: Daten (P02, P03, Stellung) sind als ASCII-File vorhanden. Graue Unterlegung der ges. Zeile bedeutet: alle Daten als ASCII-Files vorhanden.
- Die mit * gekennzeichneten Versuche wurden für Validierungsrechnungen des Rechencodes MINOVA der Fa. SCANDPOWER bereitgestellt und sind dort für Simulationsrechnungen herangezogen worden.
- RS1/RS2: Düsenrückschlagklappen in den Versuchsleitungen DN50 und DN100 (ab 11.06.1997 ausgebaut).
- Pumpenausfall trat zumeist beim Kondensationssschlag beim Wiederöffnen der Regelklappe auf. (bis 02.09.1997)

Datum Filename Versuchsdurchführung Bemerkungen

ab 02.05.97	66cbm01	Klappe Pos. 1	
02.05.97	99cbm01		
09.05.97	99cbm02	(99cbm03; 1,6 sec. Meßzeit)	
09.05.97	133cbm01		Pumpenausfall
12.05.97	99cbm04		
21.05.97	99cbm05	(99cbm07)	
23.05.97	99cbm08		
23.05.97	8cbm01	DN50	
26.05.97	25cbm01	DN50	
26.05.97	25cbm02	DN50	
26.05.97	25cbm03	DN50	
ab 28.05.97	66cbm02	lineare Schließcharakteristik	
30.05.97	99cbm11	von stat. Stellung 65° auf 0°	
30.05.97	99cbm12	von stat. Stellung 65° auf 0°	
30.05.97	99cbm13	von stat. Stellung 30° auf 0°	
30.05.97	33cbm01		
2.06.97	99cbm14	geöffnete Klappe	
5.06.97	99cbm15		
5.06.97	99cbm16		
ab 11.06.97	99cbm20	RS1 und RS2 ausgebaut	
17.06.97	99cbm21	mit; probes; wire mesh	GS an P03; 1,5 m hinter Armatur
17.06.97	99cbm22	mit; probes; wire mesh	GS an P03; 1,5 m hinter Armatur
17.06.97	99cbm23	mit; probes; wire mesh	GS an P03; 1,5 m hinter Armatur
17.06.97	99cbm24	mit; probes; wire mesh	GS an P03; 1,5 m hinter Armatur
17.06.97	33cbm03	mit; probes; wire mesh; Klappe 20 s geschlossen	GS an P03; 1,5 m hinter Armatur
17.06.97	66cbm08	mit; probes; wire mesh	GS an P03; 1,5 m hinter Armatur
17.06.97	66cbm09	mit; probes; wire mesh	GS an P03; 1,5 m hinter Armatur
17.06.97	133cbm02	mit; probes; wire mesh	GS an P03; 1,5 m hinter Armatur
17.06.97	133cbm03	mit; probes; wire mesh; Klappe 20 s geschlossen	GS an P03; 1,5 m hinter Armatur
17.06.97	99sta01	stationärer Umlauf	GS an P03; 1,5 m hinter Armatur
17.06.97	99cbm25	nur FZR-Daten	GS an P03; 1,5 m hinter Armatur
18.06.97	33cbm04	mit; probes; wire mesh	GS an P09; 4,2 m hinter P09
		Klappe 20 s geschlossen	
18.06.97	66cbm10	mit; probes; wire mesh; Klappe 20 s geschlossen	GS an P09; 4,2 m hinter P09

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
18.08.97	133dm04	mit: probes; wire mesh	GS an P09; 4,2 m hinter P09
18.08.97	133dm05	mit: probes; wire mesh	(Pumpenausfall)
18.08.97	133dm06	mit: probes; wire mesh	GS an P09; 4,2 m hinter P09
19.06.97	99dm26	mit: probes; wire mesh	GS an P09; 4,2 m hinter P09
19.06.97	99dm27	mit: probes; wire mesh	GS an P09; 4,2 m hinter P09
		nur Schließen	
▲ 19.06.97	33dm05	mit: probes; wire mesh	GS an P03; 0,15 m hinter P03
▲ 19.06.97	66dm11	mit: probes; wire mesh	
▲ 19.06.97	99dm28	mit: probes; wire mesh	Referenzversuch
▲ 19.06.97	133dm07	mit: probes; wire mesh	
19.06.97	99dm29	mit: probes; wire mesh	
07.07.97	66dm12	mit: probes; wire mesh;	
		1 Katfaufnehmer	
07.07.97	66dm13	mit: probes; wire mesh;	
		1 Katfaufnehmer	
07.07.97	99dm30	mit: probes; wire mesh;	
		1 Katfaufnehmer	
07.07.97	99dm31	mit: probes; wire mesh;	
		1 Katfaufnehmer	
08.07.97	99dm32	mit: probes; wire mesh;	99dm32_a
		1 Katfaufnehmer	
08.07.97	133dm08	mit: probes; wire mesh;	nur: P01; P02; K41; Trigg
		1 Katfaufnehmer	
12.08.97	16dm01	Klappe Pos. 1	keine Daten!
12.08.97	16dm02	mit: Glasrohr; probes	
12.08.97	16dm02	Klappe Pos. 1	keine Daten!
12.08.97	33dm06	mit: Glasrohr; probes	
12.08.97	33dm07	Klappe Pos. 1	
12.08.97	33dm08	mit: Glasrohr; probes	
12.08.97	33dm08	Klappe Pos. 1	
12.08.97	50dm01	mit: Glasrohr; probes	
12.08.97	50dm02	Klappe Pos. 1	
12.08.97	50dm03	mit: Glasrohr; probes	
12.08.97	50dm03	Klappe Pos. 1	

A-3

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
12.08.97	66dm14	Klappe Pos. 1	
		mit: Glasrohr; probes	
12.08.97	66dm15	Klappe Pos. 1	
12.08.97	66dm16	mit: Glasrohr; probes	
19.08.97	166dm01	Klappe Pos. 1	Pumpenausfall
19.08.97	166dm02	Klappe Pos. 1	Pumpenausfall
19.08.97	466dm03	Klappe Pos. 1	Pumpenausfall
19.08.97	50dmw04	Klappe Pos. 1	
		disp. Luft: 2%	
19.08.97	50dmw05	Klappe Pos. 1	
		disp. Luft: 2%	
19.08.97	50dmw06	Klappe Pos. 1	
		disp. Luft: 2%	
19.08.97	66dm17	Klappe Pos. 1	
		disp. Luft: 2%	
19.08.97	66dm18	Klappe Pos. 1	
		disp. Luft: 2%	
19.08.97	66dm19	Klappe Pos. 1	
		disp. Luft: 2%	
20.08.97	99dmw33	Klappe Pos. 1; mit: probes	
		disp. Luft: 2%	
20.08.97	99dmw34	Klappe Pos. 1; mit: probes	
		disp. Luft: 2%	
20.08.97	99dmw35	Klappe vorn	
20.08.97	132dm09	Klappe Pos. 1; mit: probes	
20.08.97	132dm10	disp. Luft: 2%	
20.08.97	132dm11	Klappe Pos. 1; mit: probes	
		disp. Luft: 2%	
20.08.97	99dmw36	Klappe Pos. 1; mit: probes	
		disp. Luft: 2%	
20.08.97	99dmw37	Klappe Pos. 1; mit: probes	
		disp. Luft: 2%	
20.08.97	99dmw38	Klappe Pos. 1; mit: probes	
		disp. Luft: 2%	
20.08.97	132dm12	Klappe Pos. 1; mit: probes	
		disp. Luft: 2%	
20.08.97	132dm13	Klappe Pos. 1; mit: probes	
		disp. Luft: 2%	

A-4

Datum Filename Versuchsdurchführung Bemerkungen

20.08.97	132cbmw14	Klappe Pos. 1; mit; probas disp. Luft 2%	
28.08.97	132cbmw15	Klappe Pos. 1;	ohne; probas; keine Kraft am WP
28.08.97	132cbmw16	Klappe Pos. 1;	ohne probas
28.08.97	132cbmw17	Klappe Pos. 1;	ohne probas
28.08.97	132cbmw18	Klappe Pos. 1;	ohne probas
28.08.97	148cbmw01	Klappe Pos. 1;	ohne probas
28.08.97	148cbmw02	Klappe Pos. 1;	ohne probas;
			Pumpenausfall bei I > 15 l/s
28.08.97	148cbmw03	Klappe Pos. 1;	ohne probas
28.08.97	148cbmw04	Klappe Pos. 1;	ohne probas
* 29.08.97	66cbmw20	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1,5%	
29.08.97	66cbmw21	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1,5%	
29.08.97	66cbmw22	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1,5%	
29.08.97	99cbmw29	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1,5%	
02.09.97	144cbmw01	Klappe Pos. 1	P23 ungültig
02.09.97	165cbmw03	Klappe Pos. 1	Ausfall von: Pumpe, probas, wire mesh, Kraftaufnehmer
* 03.09.97	99cbmw40	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1,5%	
* 03.09.97	99cbmw41	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1,5%	
03.09.97	132cbmw19	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1,5%	
03.09.97	132cbmw20	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1,5%	
03.09.97	132cbmw21	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1,5%	
04.09.97	50cbmw07	Klappe Pos. 1;	
04.09.97	50cbmw08	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1,5%	
04.09.97	50cbmw09	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1,5%	
04.09.97	66cbmw23	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1%	

Datum Filename Versuchsdurchführung Bemerkungen

04.09.97	66cbmw24	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1%	
04.09.97	66cbmw25	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1%	
* 05.09.97	165cbmw04	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1%	
05.09.97	165cbmw05	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1%	
05.09.97	165cbmw06	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1%	
05.09.97	165cbmw07	Klappe Pos. 1; disp. Luft 2%	
05.09.97	165cbmw08	Klappe Pos. 1; disp. Luft 2%	
05.09.97	165cbmw09	Klappe Pos. 1; disp. Luft 2%	
* 05.09.97	165cbmw10	Klappe Pos. 1; disp. Luft 4%	
* 05.09.97	165cbmw11	Klappe Pos. 1; disp. Luft 6%	
* 05.09.97	165cbmw12	Klappe Pos. 1; disp. Luft 10%	
* 08.09.97	165cbmw13	Klappe Pos. 1; disp. Luft 0,4%	
08.09.97	165cbmw14	Klappe Pos. 1; keine disp. Luft	
08.09.97	165cbmw15	Klappe Pos. 1;	ohne; probas
08.09.97	165cbmw16	Klappe Pos. 1;	ohne; probas
08.09.97	165cbmw17	Klappe Pos. 1; disp. Luft 0,4%	
08.09.97	132cbmw22	Klappe Pos. 1; keine disp. Luft	
08.09.97	132cbmw23	Klappe Pos. 1; keine disp. Luft	
08.09.97	99cbmw42	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1,5%	
08.09.97	99cbmw43	Klappe Pos. 1; disp. Luft 1,5%	
08.09.97	66cbmw26	Klappe Pos. 1; keine disp. Luft	ohne Luft

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
09.09.97	66dmh27	Klappe Pos. 1; keine disp. Luft	ohne Luft
09.09.97	99dmh44	Klappe Pos. 1; Bypass	keine Kraft am WP
09.09.97		Klappe Pos. 1; Bypass	nur Probes (44, 2); Wärmesth (44, 2)
09.09.97	165dmv18	Klappe Pos. 1; Bypass	Teilastlast Mehreinhalte
09.09.97	165dmv19	Klappe Pos. 1; Bypass	stationärer Versuch
09.09.97	165dmv20	Klappe Pos. 1; Bypass disp. Luft 2%	stationärer Versuch
09.09.97	165dmv21	Klappe Pos. 1; Bypass	stationärer Versuch; keine Daten!
12.09.97	66dmh28	Klappe Pos. 1; Bypass	keine Kraft am WP
* 12.09.97	99dmh29	Klappe Pos. 1; Bypass	
* 12.09.97	99dmh45	Klappe Pos. 1; Bypass	
12.09.97	99dmh46	Klappe Pos. 1; Bypass	
* 12.09.97	132dmh24	Klappe Pos. 1; Bypass	
12.09.97	132dmh25	Klappe Pos. 1; Bypass	
* 12.09.97	165dmh22	Klappe Pos. 1; Bypass	
12.09.97	165dmh23	Klappe Pos. 1; Bypass	
* 12.09.97	198dmh01	Klappe Pos. 1; Bypass	
12.09.97	198dmh02	Klappe Pos. 1; Bypass	
26.09.97	33dmh09	Klappe Pos. 2; Bypass:	ohne: probes: P24
26.09.97	33dmh10	Klappe Pos. 2; Bypass:	
26.09.97	33dmh11	Klappe Pos. 2; Bypass:	
26.09.97	66dmh30	Klappe Pos. 2; Bypass:	m2 gültig
26.09.97	66dmh31	Klappe Pos. 2; Bypass:	
26.09.97	66dmh32	Klappe Pos. 2; Bypass:	
26.09.97	99dmh17	Klappe Pos. 2; Bypass:	Kraft Kx2 schlecht
26.09.97	99dmh48	Klappe Pos. 2; Bypass:	Kraft Kx2 schlecht
26.09.97	99dmh49	Klappe Pos. 2; Bypass:	Kraft Kx2 schlecht
26.09.97	132dmh26	Klappe Pos. 2; Bypass:	Kraft Kx2 schlecht
26.09.97	132dmh27	Klappe Pos. 2; Bypass:	Kraft Kx2 schlecht
26.09.97	132dmh28	Klappe Pos. 2; Bypass:	Kraft Kx2 schlecht
26.09.97	165dmh24	Klappe Pos. 2; Bypass:	Kraft Kx2 schlecht
26.09.97	165dmh25	Klappe Pos. 2; Bypass:	
26.09.97	165dmh26	Klappe Pos. 2; Bypass:	
30.09.97	465dmh26	Klappe Pos. 2; Bypass:	
30.09.97	66dmh33	Klappe Pos. 2; Bypass: disp.Luft 1%	
30.09.97	66dmh34	Klappe Pos. 2; Bypass: disp.Luft 1%	

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
30.09.97	99dmh50	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 1%	
30.09.97	99dmh51	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 1%	
30.09.97	132dmh29	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 0,5%	wire & probes: /2 gültig
30.09.97	132dmh30	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 0,5%	
01.10.97	132dmh31	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 1%	
01.10.97	132dmh32	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 1%	
01.10.97	132dmh33	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 1%	
01.10.97	132dmh34	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 1,5%	
01.10.97	165dmh27	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 0,5%	
01.10.97	165dmh28	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 0,5%	
01.10.97	165dmh29	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 0,5%	
01.10.97	165dmh30	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 1%	
01.10.97	165dmh31	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 1%	
01.10.97	165dmh32	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 3%	
01.10.97	99dmh52	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 3%	
02.10.97	66dmh35	Klappe Pos. 2; Bypass; disp.Luft 1,5%	
* 02.10.97	66dmh36	Klappe Pos. 2; Bypass:	
02.10.97	99dmh53	Klappe Pos. 2; Bypass:	
02.10.97	99dmh54	Klappe Pos. 2; Bypass:	
* 02.10.97	132dmh35	Klappe Pos. 2; Bypass:	
02.10.97	132dmh36	Klappe Pos. 2; Bypass:	
* 02.10.97	165dmh33	Klappe Pos. 2; Bypass:	
07.10.97	99dmh56	Ventil Pos. 1; 25% gedrosselt; Bypass	
07.10.97	99dmh57	Ventil Pos. 1; Bypass	

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
07.10.97	99cbm58	Ventil Pos.1; Bypass	
07.10.97	132cbm37	Ventil Pos.1; Bypass	
07.10.97	132cbm38	Ventil Pos.1; Bypass	
07.10.97	132cbm39	Ventil Pos.1; Bypass	
07.10.97	165cbm36	Ventil Pos.1; Bypass	
07.10.97	165cbm37	Ventil Pos.1; Bypass	
06.11.97	99cbm60	Klappe Pos.1; Drossel: s = 12 mm	
06.11.97	99cbm60	Klappe Pos.1;	
06.11.97	99cbm61	Klappe Pos.1; Drossel: s = 12 mm	
06.11.97	99cbm62	Klappe Pos.1; Drossel: s = 11,5 mm	
06.11.97	99cbm63	Klappe Pos.1; Drossel: s = 11 mm	
06.11.97	99cbm64	Klappe Pos.1; Drossel: s = 11 mm	
06.11.97	99cbm65	Klappe Pos.1; Drossel: s = 10,5 mm	
06.11.97	99cbm66	Klappe Pos.1; Drossel: s = 10,5 mm	
06.11.97	99cbm67	Klappe Pos.1; Drossel: s = 10 mm	
06.11.97	99cbm68	Klappe Pos.1; Drossel: s = 10 mm	
06.11.97	99cbm69	Klappe Pos.1; Drossel: s = 9,5 mm	
06.11.97	99cbm70	Klappe Pos.1; Drossel: s = 9,5 mm	
06.11.97	99cbm71	Klappe Pos.1; Drossel: s = 9 mm	
06.11.97	99cbm72	Klappe Pos.1; Drossel: s = 9 mm	
06.11.97	99cbm73	Klappe Pos.1; Drossel: s = 8,5 mm	
06.11.97	99cbm74	Klappe Pos.1; Drossel: s = 8,5 mm	
06.11.97	99cbm75	Klappe Pos.1; Drossel: s = 8 mm	

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
06.11.97	99cbm76	Klappe Pos.1; Drossel: s = 8 mm	
06.11.97	99cbm77	Klappe Pos.1; Drossel: s = 7,5 mm	
06.11.97	99cbm78	Klappe Pos.1; Drossel: s = 7,5 mm	
06.11.97	99cbm79	Klappe Pos.1; Drossel: s = 7 mm	
06.11.97	99cbm80	Klappe Pos.1; Drossel: s = 7 mm	
06.11.97	99cbm81	Klappe Pos.1; Drossel: s = 6 mm	
06.11.97	99cbm82	Klappe Pos.1; Drossel: s = 6 mm	
06.11.97	99cbm83	Klappe Pos.1; Drossel: s = 6,5 mm	
06.11.97	99cbm84	Klappe Pos.1; Drossel: s = 6,5 mm	
06.11.97	99cbm85	Klappe Pos.1; Drossel: s = 6,25 mm	
06.11.97	99cbm86	Klappe Pos.1; Drossel: s = 6,25 mm	
10.11.97	99cbm87	Klappe Pos.1; Drossel: s = 5,5 mm	
10.11.97	99cbm88	Klappe Pos.1; Drossel: s = 5,5 mm	
10.11.97	99cbm89	Klappe Pos.1; Drossel: s = 5,25 mm	
10.11.97	99cbm90	Klappe Pos.1; Drossel: s = 5,25 mm	
10.11.97	99cbm91	Klappe Pos.1; Drossel: s = 5,2 mm	
10.11.97	99cbm92	Klappe Pos.1; Drossel: s = 5,2 mm	
10.11.97	99cbm93	Klappe Pos.1; ohne Drossel	
10.11.97	99cbm94	Klappe Pos.1; ohne Drossel	
10.11.97	99cbm95	Klappe Pos.1; Drossel: s = 5,75 mm	
10.11.97	99cbm96	Klappe Pos.1; Drossel: s = 5,75 mm	

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
04.12.97	33c05dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
04.12.97	33c06dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
04.12.97	42c06dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
04.12.97	42c07dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
09.12.97	8e04dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
09.12.97	8c05dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
09.12.97	16c07dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
09.12.97	16c08dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
09.12.97	25c07dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
09.12.97	25e08dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
09.12.97	25c09dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
★ 09.12.97	33c07dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
09.12.97	33c08dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
09.12.97	42c08dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
09.12.97	42c09dn5	DN50; Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh 45°	
10.12.97	99c113d1	Ventil Pos.1; Öffnung nach 10 s	
10.12.97	99c114d1	Ventil Pos.1; Öffnung nach 7 s	
10.12.97	99c115d1	Ventil Pos.1; Öffnung nach 4 s	
10.12.97	99c116d1	Ventil Pos.1; Öffnung nach 9 s	
10.12.97	99c117d1	Ventil Pos.1; Öffnung nach 7 s	
10.12.97	99c118d1	Ventil Pos.1; Öffnung nach 7 s	
12.12.97	33c11d1	Ventil Pos.1	F1x, bei t < 1s;
12.12.97	33c12d1	Ventil Pos.1	F1x, bei t < 1s; F2x, bei t > 7s
12.12.97	66c37d1	Ventil Pos.1	F1x,F2x, bei t > 7s
12.12.97	66c38d1	Ventil Pos.1	F1x,F2x, bei t > 7s

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
12.12.97	99c119d1	Ventil Pos.1	F1x,F2x, bei t > 7s
12.12.97	99c120d1	Ventil Pos.1	F1x,F2x, bei t > 7s
12.12.97	132c99d1	Ventil Pos.1	F1x,F2x, bei t > 7s
12.12.97	132c40d1	Ventil Pos.1	F1x, F2x, bei t > 7s
19.12.97	99c121d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 0%	
19.12.97	99c122d1	Klappe Pos.1;	
19.12.97	99c123d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 48%	
19.12.97	99c124d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 8%	
19.12.97	99c125d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 3%	
19.12.97	99c126d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 3%	
19.12.97	99c127d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 38%	
19.12.97	99c128d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 38%	
19.12.97	99c129d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 33%	
19.12.97	99c130d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 28%	
19.12.97	99c131d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 23%	
19.12.97	99c132d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 28%	
19.12.97	99c133d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 23%	
19.12.97	99c134d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 23%	
19.12.97	99c135d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 18%	
19.12.97	99c136d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 18%	
19.12.97	99c137d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 12%	
19.12.97	99c138d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 12%	

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
19.12.97	99c139d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 9%	
19.12.97	99c140d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 9%	
19.12.97	99c141d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 5%	
19.12.97	99c142d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 5%	
19.12.97	99c143d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 5%	
19.12.97	99c144d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 5%	
19.12.97	99c145d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 7%	
19.12.97	99c146d1	Klappe Pos.1; Stellung: 100 - 7%	
22.12.97	33c13d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 0%	100% - 0%
22.12.97	33c14d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 0%	100% - 0%
22.12.97	66c39d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 0%	100% - 0%
22.12.97	66c40d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 0%	100% - 0%
22.12.97	99c147d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 0%	100% - 0%
22.12.97	99c148d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 0%	100% - 0%
22.12.97	132c41d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 0%	
22.12.97	132c42d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 0%	
23.12.97	99c149d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 0%	
23.12.97	99c150d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 0%	
23.12.97	99c151d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 49%	
23.12.97	99c152d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 49%	

A-15

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
23.12.97	99c153d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 39%	
23.12.97	99c154d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 39%	
23.12.97	99c155d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 30%	100% - 30%
23.12.97	99c156d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 30%	100% - 30%
23.12.97	99c157d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 19%	100% - 19%
23.12.97	99c158d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 19%	
23.12.97	99c159d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 14%	
23.12.97	99c160d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 14%	
23.12.97	99c162d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 9%	
23.12.97	99c163d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 12%	
23.12.97	99c164d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 12%	
23.12.97	99c165d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 11%	
23.12.97	99c166d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 11%	
23.12.97	99c167d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 35%	
23.12.97	99c168d1	zentr. Klappe Pos.1 Stellung: 100 - 35%	
06.01.98	33c15d1	zentr. Klappe Pos.2 Stellung: 100 - 35%	Max(P02) später als das Max(P03)
06.01.98	33c16d1	zentr. Klappe Pos.2	
06.01.98	66c41d1	zentr. Klappe Pos.2	
06.01.98	66c42d1	zentr. Klappe Pos.2	
06.01.98	99c169d1	zentr. Klappe Pos.2	
06.01.98	99c170d1	zentr. Klappe Pos.2	
06.01.98	132c43d1	zentr. Klappe Pos.2	
06.01.98	132c44d1	zentr. Klappe Pos.2	

A-16

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
08.01.98	33c17d1	Ventil Pos.2	
08.01.98	33c18d1	Ventil Pos.2	
08.01.98	66c43d1	Ventil Pos.2	
08.01.98	66c44d1	Ventil Pos.2	
08.01.98	99c171d1	Ventil Pos.2	
08.01.98	99c172d1	Ventil Pos.2	
08.01.98	132c45d1	Ventil Pos.2	
08.01.98	132c66d1	Ventil Pos.2	
08.01.98	165c38d1	Ventil Pos.2	
08.01.98	165c39d1	Ventil Pos.2	
13.01.98	99c173d1	Klappe Pos.1; Drossel: offen	
13.01.98	99c174d1	Klappe Pos.1; Drossel: offen	
13.01.98	99c175d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 12 mm	
13.01.98	99c176d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 10 mm	
13.01.98	99c177d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 12 mm	
13.01.98	99c178d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 10 mm	
13.01.98	99c179d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 8 mm	
13.01.98	99c180d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 8 mm	
13.01.98	99c181d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 6 mm	
13.01.98	99c182d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 6 mm	
13.01.98	99c183d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 5 mm	
13.01.98	99c184d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 5 mm	
13.01.98	99c185d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 5 mm	ohne Durchfluß
13.01.98	99c186d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 5 mm	ohne Durchfluß
13.01.98	99c187d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 4 mm	

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
13.01.98	99c188d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 4 mm	
13.01.98	99c189d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 3,8 mm	
13.01.98	99c190d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 3,8 mm	
13.01.98	99c191d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 5,5 mm	
13.01.98	99c192d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 5,5 mm	
13.01.98	99c193d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 4,5 mm	
13.01.98	99c194d1	Klappe Pos.1; Drossel: s = 4,5 mm	
13.01.98	99c195d1	Klappe Pos.1; Drossel: Blindstopfen	
13.01.98	99c196d1	Klappe Pos.1; Drossel: Blindstopfen	
14.01.98	15100d1;	Klappe Pos.1;	
25100d1;		ruhende Flüssigkeit; T = 13 °C	
35148d1;		Stellung von jeweils 100 % bis:	
45148d1;		0 %	
55138d1;		48 %	
65138d1;		38 %	
75128d1;		28 %	
85128d1;		18 %	
95118d1;		9 %	
105118d1;			
115109d1;			
125109d1;			
14.01.98	a5100d1;	Klappe Pos.1;	
b5100d1;		ruhende Flüssigkeit; T = 13 °C	
a5118d1;		Stellung von jeweils 100 % bis:	
b5118d1;		0 %	
a5138d1;		18 %	
a5148d1;		38 %	
b5148d1;		48 %	

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
22.01.98	h1sted1:	Klappe:	Messung der Stellung am
	h2sted1:	ohne Flüssigkeit; T = 20 °C	Hall-Sensor (h)
	h3sted1:	Stellung von jeweils 100 % bis:	
	h4sted1:	40 %	
	h5sted1:	18 %	
	h6sted1:		
	h7sted1:		
23.01.98	r1sted1:	Klappe	Messung der Stellung am
	r2sted1:	ohne Flüssigkeit; T = 20 °C	Reglerausgang (r)
	r3sted1:	Stellung von jeweils 100 % bis:	
	r4sted1:	40 %	
	r5sted1:	18 %	
	r6sted1:		
	r7sted1:		
23.01.98	h8sted1:	Klappe:	Messung der Stellung am
	h9sted1:	ohne Flüssigkeit:	Hall-Sensor (h)
	h10sted1:	mit Abblutdrossel; ohne Überwurf	
	h11sted1:	Drossel:	
	h12sted1:	s = 8,0 mm	
	h13sted1:	s = 5,5 mm	
	h14sted1:	s = 4,5 mm	
	h15sted1:	mit Blindstopfen	
	h16sted1:		
	h17sted1:		
	23.01.98	r8sted1:	Klappe:
r9sted1:		ohne Flüssigkeit:	Reglerausgang (r)
r10sted1:		mit Abblutdrossel; ohne Überwurf	
r11sted1:		Drossel:	
r12sted1:		s = 8,0 mm	
r13sted1:		s = 5,5 mm	
r14sted1:		s = 4,5 mm	
26.01.98	r15sted1:	mit Blindstopfen	
	r16sted1:		
	r17sted1:		
26.01.98	h19sted1:	zentr. Klappe:	Messung der Stellung am
	h20sted1:	ohne Flüssigkeit:	Hall-Sensor (h)
26.01.98	r18sted1:	Stellung von 100 bis 0 %	
	r19sted1:	zentr. Klappe:	Messung der Stellung am
	r20sted1:	ohne Flüssigkeit:	Reglerausgang (r)
26.01.98	r20sted1:	Stellung von 100 bis 0 %	

Anhang 2 Versuche im Zeitraum Februar bis März 1998

Der Anhang 2 beinhaltet eine Auflistung der in den Monaten Februar bis März 1998 durchgeführten Versuche an der Versuchsanlage bei Fraunhofer UMSICHT zum Thema:

Blowdown-Versuche in die leere bzw. teilgefüllte Versuchsstation DN100 unter Variation der vorgelegten Wassermenge, der axialen Position des Wasserpfropfens und der Anlagengeometrie.

Bemerkungen:

- Die Versuche ab dem 24.02.1998 wurden mit einem Gittersensor hinter der Meßposition P05 (x = 181 m) durchgeführt.
- Die Versuche 15ba17d1, 15ba1ed1, 10b3z2d1, 05ba05d1 und 05ba06d1 wurden hierarchisch eingeordnet am 03.03.1998, durchgeführt jedoch am 12.03.1998, nach der Reparatur der Rohrbrücke.
- Wasser wurde vorgelegt in Verteilung 1 (x = 20 m) und am Wendepunkt (WP).
- Beim Versuch 30ba10d1 wurde wegen Bruch des Hebels des Kugelhahnes nur eine Teilöffnung des Hahnes erreicht.
- Die mit * gekennzeichneten Versuche wurden für Validierungsrechnungen des Rechencodes MONA der Fa. SCANDPOWER bereitgestellt und sind dort für Simulationsberechnungen herangezogen worden.
- Grüne Unterlegung der Filenames bedeutet: Daten (P02, P03, Stellung) sind als ASCII-File vorhanden
- Grüne Unterlegung der gesamten Zeile bedeutet: alle Daten als ASCII-Files vorhanden.

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
02.02.98	10ba01d1-	Klappe Pos.1, ohne Flüssigkeit	
06.02.98	10ba06d1		Testversuche
09.02.98	05ba07d1	Klappe Pos.1, ohne Flüssigkeit	
09.02.98	05ba02d1	Klappe Pos.1, ohne Flüssigkeit	
09.02.98	10ba06d1	Klappe Pos.1, ohne Flüssigkeit	
09.02.98	10ba07d1	Klappe Pos.1, ohne Flüssigkeit	
09.02.98	15ba01d1	Klappe Pos.1, ohne Flüssigkeit	Klappe öffnet nach Triggersignal
09.02.98	15ba02d1	Klappe Pos.1, ohne Flüssigkeit	
09.02.98	15ba03d1	Klappe Pos.1, ohne Flüssigkeit	
09.02.98	20ba01d1	Klappe Pos.1, ohne Flüssigkeit	
09.02.98	20ba02d1	Klappe Pos.1, ohne Flüssigkeit	
10.02.98	05ba03d1	Klappe Pos.1, rnit: Bypass; V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1	P24 zu gering
10.02.98	15ba04d1	Klappe Pos.1, ohne Flüssigkeit	Klappe öffnet nach Triggersignal
10.02.98	10ba08d1	Klappe Pos.1, rnit: Bypass; V(Vorlage) = 2l, 5l an Vertiefung 1	Klappenleackage
			1
10.02.98	15ba05d1	Klappe Pos.1, ohne Flüssigkeit	
11.02.98	15ba06d1	Klappe Pos.1, ohne Flüssigkeit	
11.02.98	15ba07d1	Klappe Pos.1, ohne Flüssigkeit	
11.02.98	20ba04d1	Kugelhahn Pos.1; mit: Bypass	Klappenleackage
11.02.98	20ba05d1	V(Vorlage) = 20l an Vertiefung 1 Kugelhahn Pos.1; mit: Bypass	
11.02.98	25ba07d1	V(Vorlage) = 20l an Vertiefung 1	
12.02.98	10ba09d1	Kugelhahn Pos.1; mit: Bypass	Klappenleackage
12.02.98	10ba10d1	V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1 Kugelhahn Pos.1; mit: Bypass	
12.02.98	20ba05d1	V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1 Kugelhahn Pos.1; mit: Bypass	
12.02.98	20ba06d1	Kugelhahn Pos.1; mit: Bypass	
12.02.98	20ba06d1	V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1 Kugelhahn Pos.1; mit: Bypass	

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
12.02.98	20ba07d1	Kugelhahn Pos.1; mit: Bypass	
12.02.98	30ba01d1	V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1 Kugelhahn Pos.1; mit: Bypass	
12.02.98	30ba02d1	V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1 Kugelhahn Pos.1; mit: 2 Glasrohren; Bypass V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1	
12.02.98	15ba08d1	Kugelhahn Pos.1; mit: 2 Glasrohren; Bypass V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1	
17.02.98	15ba09d1	Kugelhahn Pos.1; mit: 2 Glasrohren; Bypass V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1	Ausfall PO2, PO3, PO5, PO6
17.02.98	20ba08d1	Kugelhahn Pos.1; mit: 2 Glasrohren; Bypass V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1	
17.02.98	20ba09d1	Kugelhahn Pos.1; mit: 2 Glasrohren; Bypass V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1	
18.02.98	20ba10d1	Kugelhahn Pos.1; mit: 2 Glasrohren; Bypass V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1	
★ 19.02.98	15ba10d1	Kugelhahn Pos.1; mit: wire mesh; 2 Glasrohren; Bypass V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1	
★ 19.02.98	20ba11d1	Kugelhahn Pos.1; mit: wire mesh; 2 Glasrohren; Bypass V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1	
19.02.98	25ba02d1	V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1 Kugelhahn Pos.1; mit: wire mesh; 2 Glasrohren; Bypass	
★ 19.02.98	25ba03d1	V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1 Kugelhahn Pos.1; mit: wire mesh; 2 Glasrohren; Bypass	
19.02.98	30ba03d1	V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1 Kugelhahn Pos.1; mit: wire mesh; 2 Glasrohren; Bypass	
20.02.98	30ba04d1	V(Vorlage) = 49l an Vertiefung 1 Kugelhahn Pos.1; mit: wire mesh; 2 Glasrohren; Bypass	

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
24.02.98	10ba11d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: wire mesh; 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 20l an Verteilung 1	am GS nichts zu sehen
24.02.98	10ba12d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: wire mesh; 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 20l an Verteilung 1	am GS nichts zu sehen
24.02.98	20ba12d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: wire mesh; 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 20l an Verteilung 1	am GS nichts zu sehen
24.02.98	20ba13d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: wire mesh; 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 20l an Verteilung 1	am GS nichts zu sehen
24.02.98	30ba05d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: wire mesh; 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 20l an Verteilung 1	am GS nichts zu sehen
24.02.98	30ba06d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: wire mesh; 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 20l an Verteilung 1	am GS nichts zu sehen
24.02.98	30ba07d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: wire mesh; 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 20l an Verteilung 1	am GS nichts zu sehen
25.02.98	10ba13d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 66l am WP	Teilaustfall PQ2
25.02.98	10ba14d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 66l am WP	
25.02.98	20ba14d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 66l am WP	
25.02.98	20ba15d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 66l am WP	
25.02.98	30ba08d1	Kugelhahn Pos. 1; Bypass; ohne Flüssigkeit	
25.02.98	30ba09d1	Kugelhahn Pos. 1; Bypass ohne Flüssigkeit	
27.02.98	10ba15d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 20l am WP	schlechte GS-Daten
27.02.98	10ba16d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 20l am WP	schlechte GS-Daten

A-23

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
27.02.98	20ba16d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 20l am WP	schlechte GS-Daten
27.02.98	20ba17d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 20l am WP	schlechte GS-Daten
27.02.98	30ba10d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 20l am WP	Handhebel der Kugelhahns gebrochen; schlechte GS-Daten
27.02.98	30ba11d1	Kugelhahn Pos. 1; mit: 2 Glasrohren; Bypass VV(Vorlage) = 20l am WP	schlechte GS-Daten
03.03.98	05ba05d1	Kugelhahn Pos. 1; an Verteilung 1	Daten unter 12.03.; schlechte GS-Daten
03.03.98	05ba06d1	Kugelhahn Pos. 1; an Verteilung 1	Daten unter 12.03.; schlechte GS-Daten
03.03.98	10ba17d1	Kugelhahn Pos. 1; an Verteilung 1	schlechte GS-Daten
03.03.98	10ba18d1	Kugelhahn Pos. 1; an Verteilung 1	schlechte GS-Daten
03.03.98	10ba22d1	Kugelhahn Pos. 1; an Verteilung 1	Daten unter 12.03.; schlechte GS-Daten
03.03.98	15ba11d1	Trocknen	DAMMAGE!!!
03.03.98	15ba12d1	Kugelhahn Pos. 1; an Verteilung 1	schlechte GS-Daten
03.03.98	15ba16d1	Kugelhahn Pos. 1; an Verteilung 1	Daten unter 12.03.; schlechte GS-Daten
03.03.98	15ba17d1	Kugelhahn Pos. 1; an Verteilung 1	Daten unter 12.03.; schlechte GS-Daten
11.03.98	05ba04d1	Kugelhahn Pos. 1; an Verteilung 1	am GS nichts zu sehen
11.03.98	10ba19d1	Kugelhahn Pos. 1; an Verteilung 1	am GS nichts zu sehen
11.03.98	10ba20d1	Kugelhahn Pos. 1; an Verteilung 1	am GS nichts zu sehen
11.03.98	10ba21d1	Kugelhahn Pos. 1; an Verteilung 1	am GS nichts zu sehen
11.03.98	15ba13d1	Kugelhahn Pos. 1; an Verteilung 1	am GS nichts zu sehen
11.03.98	15ba14d1	Kugelhahn Pos. 1; an Verteilung 1	am GS nichts zu sehen

A-24

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
11.03.98	15ba15d1	Kugelhahn Pos.1; V(Vorlage) = 20 an Vertiefung 1	am GS nichts zu sehen
11.03.98	20ba118d1	Kugelhahn Pos.1; V(Vorlage) = 20 an Vertiefung 1	am GS nichts zu sehen
11.03.98	20ba119d1	Kugelhahn Pos.1; V(Vorlage) = 20 an Vertiefung 1	am GS nichts zu sehen

Anhang 3 Versuche im Zeitraum Mai bis Juni 1998

Der Anhang 3 beinhaltet eine Auflistung der in den Monaten Mai bis Juni 1998 durchgeführten Versuche an der Versuchsanlage bei Fraunhofer UMSICHT zum Thema:

Einströmen von Flüssigkeit in eine leere Rohrleitung

Bemerkungen:

- Die Leitungsführung sowie die Meßstellen sind identisch mit denen der Versuchsreihe „Blowdown“ mit Rohrbrücke
- Grau hinterlegte Filenames bedeuten: Gittersensor vor der Meßposition P05

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
04.05.98	05ba07d1		
04.05.98	05ba08d1		
04.05.98	05ba09d1		
04.05.98	10ba23d1		
04.05.98	10ba24d1		
05.05.98	15ba20d1		Ausfall P05
05.05.98	15ba21d1		Ausfall P05
05.05.98	20ba20d1		Ausfall P05
05.05.98	20ba21d1		Ausfall P05
02.06.98	ab 25ba04d1	mit: wire mesh vor P05; Kraftaufnehmer am FP3	
02.06.98	25ba05d1	mit: wire mesh vor P05; Kraftaufnehmer am FP3	
02.06.98	30ba12d1	mit: wire mesh vor P05; Kraftaufnehmer am FP3	
02.06.98	30ba13d1	mit: wire mesh vor P05; Kraftaufnehmer am FP3	
02.06.98	20ba22d1	mit: wire mesh vor P05; Kraftaufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 24%
02.06.98	10ba25d1	mit: wire mesh vor P05; Kraftaufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 22%
08.06.98	05ba10d1	mit: wire mesh vor P05; Kraftaufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = -1%
08.06.98	05ba11d1	mit: wire mesh vor P05; Kraftaufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = -1%
08.06.98	10ba26d1	mit: wire mesh vor P05; Kraftaufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 26,6%
08.06.98	10ba27d1	mit: wire mesh vor P05; Kraftaufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 21,9%
08.06.98	15ba22d1	mit: wire mesh vor P05; Kraftaufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 23,3%
09.06.98	15ba23d1	mit: wire mesh vor P05; Kraftaufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 24%
09.06.98	25ba06d1	mit: wire mesh vor P05; Kraftaufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 25%
09.06.98	25ba07d1	mit: wire mesh vor P05; Kraftaufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 24,6%
10.06.98	15ba24d1	mit: wire mesh vor P05; Bypass; Kraftaufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 23,7%
15.06.98	10ba28d1	mit: wire mesh vor P05; Bypass; Kraftaufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 2421,7%

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
15.06.98	10bz29d1	mit: wire mesh vor PO5; Bypass: Kraftraufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 22,7%
15.06.98	20ba23d1	mit: wire mesh vor PO5; Bypass: Kraftraufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 24,4%
15.06.98	20ba24d1	mit: wire mesh vor PO5; Bypass: Kraftraufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 24,2%
16.06.98	30ba14d1	mit: wire mesh vor PO5; Bypass: Kraftraufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 25,8%
16.06.98	30ba15d1	mit: wire mesh vor PO5; Bypass: Kraftraufnehmer am FP3	Füllstand B2 nach Versuchsende: V = 25,5%

Anhang 4 Versuche im Zeitraum Juni bis November 1998

Der Anhang 4 beinhaltet eine Auflistung der in den Monaten Juni bis November 1998 durchgeführten Versuche an der Versuchsanlage bei Fraunhofer UMSICHT zum Thema:

Armaturenverschleiß bei stationärer Flüssigkeitsströmung unter Variation des Armaturenbaus der Schließcharakteristik, der stationären Volumenströme von Wasser und PEG 3000-Lösung mit geometrischen Veränderungen des Rohrsystems und mit Überprüfung des Mesystems zur Erfassung instationärer Volumenströme und unter Einsatz einer Rückschlagklappe zur Verhinderung von Kavitationsschlägen.

Bemerkungen:

- „Bypass“ bedeutet: Ersatz der hinterhenden Rohrleitung durch ein waagrechttes Rohrleitern; der Hochpunkt im rücklaufenden Teil bleibt unverändert. Sind keine Angaben gemacht, so ist die Rohrbrücke implementiert
- Sind Güterensordaten („wire mesh“ oder G5) vorhanden, ist die Datums-Spalte der Versuche grau markiert
- Kurze Filenames bedeutet: gut kalibrierte GS-Daten; durchgehende Filenames: GS-Daten nicht tauglich
- Graue Unterteilung der Filenames bedeutet: Daten (PO2, PO3, Stellung) sind als ASCII-File vorhanden
- Graue Unterteilung der gesamten Zeile bedeutet: alle Daten als ASCII-Files vorhanden

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
30.06.98	99c207d1	Kugelhahn Pos. 1	Test: Schließzeitoptimierung des Kugelhahns - Entlüftung *
30.06.98	99c208d1	Kugelhahn Pos. 1	Test: Schließzeitoptimierung des Kugelhahns - Entlüftung *
30.06.98	99c209d1	Kugelhahn Pos. 1	Test: Schließzeitoptimierung des Kugelhahns - Entlüftung * 7 bar Steuerung
01.07.98	99c210d1	Kugelhahn Pos. 1	Testversuch
07.07.98	66c45d1	Kugelhahn Pos. 1	
07.07.98	66c46d1	Kugelhahn Pos. 1	
07.07.98	99c211d1	Kugelhahn Pos. 1	
07.07.98	99c212d1	Kugelhahn Pos. 1	
07.07.98	132c47d1	Kugelhahn Pos. 1	
07.07.98	132c48d1	Kugelhahn Pos. 1	
07.07.98	165c40d1	Kugelhahn Pos. 1	
07.07.98	165c41d1	Kugelhahn Pos. 1	
09.07.98	99a4e4d1	zentr. Klappe Pos. 1	Schließzeitversuch
09.07.98	99a4e5d1	zentr. Klappe Pos. 1	Schließzeitversuch
09.07.98	99a4e6d1	zentr. Klappe Pos. 1	Schließzeitversuch
10.07.98	66c47d1	zentr. Klappe Pos. 1	
10.07.98	66c48d1	zentr. Klappe Pos. 1	
10.07.98	99c213d1	zentr. Klappe Pos. 1	
10.07.98	99c214d1	zentr. Klappe Pos. 1	
10.07.98	132c49d1	zentr. Klappe Pos. 1	
10.07.98	132c50d1	zentr. Klappe Pos. 1	
10.07.98	165c42d1	zentr. Klappe Pos. 1	
10.07.98	165c43d1	zentr. Klappe Pos. 1	
16.07.98	41c01d1	zentr. Klappe Pos. 1;	
16.07.98	50c10d1	zentr. Klappe Pos. 1;	
16.07.98	50c11d1	zentr. Klappe Pos. 1;	
17.07.98	41c02d1	zentr. Klappe Pos. 1;	
17.07.98	50c12d1	zentr. Klappe Pos. 1;	
17.07.98	50c12d1	mit: Glasrohr, RS-Klappe Pos. 1;	
17.07.98	50c12d1	mit: Glasrohr, RS-Klappe Pos. 1;	Versuch benannt als 41c03d1.m1 wire mesh

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
17.07.98	50c13d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 1; VHS; slow	
17.07.98	50c14d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 1; VHS; slow	Wasser blau
17.07.98	66c49d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 1; VHS; slow	P18; T07; sie fehlen
17.07.98	66c50d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 1; VHS; slow	
17.07.98	66c51d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 1; VHS; slow	Wasser blau
17.07.98	83c01d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Z. Klappe Pos. 1; VHS; slow	
17.07.98	83c02d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 1; VHS;	Wasser blau
17.07.98	99c215d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 1; VHS;	
17.07.98	99c216d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 1; VHS;	
21.07.98	50c15d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; ohne RS-Klappe; VHS;	Wasser rosa Durchfluß mittels MID
21.07.98	66c52d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; ohne RS-Klappe; VHS;	Wasser rosa Durchfluß mittels MID
21.07.98	66c53d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; ohne RS-Klappe; VHS;	Wasser rosa Durchfluß mittels MID
21.07.98	66c54d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 2; VHS; P05 vor RS-Klappe	Wasser rosa Durchfluß mittels MID

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
21.07.98	66c55d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 2; VHS; P05 vor RS-Klappe	Wasser rosa Durchfluß mittels MID nur Stellung
21.07.98	66c56d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 2; VHS; P05 vor RS-Klappe	Wasser rosa Durchfluß mittels MID nur Stellung
21.07.98	66c57d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 2; VHS; P05 vor RS-Klappe	Wasser rosa Durchfluß mittels MID nur Stellung
21.07.98	99c217d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 2; VHS; P05 vor RS-Klappe	Wasser rosa Durchfluß mittels MID nur Stellung
21.07.98	99c218d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 2; VHS; P05 vor RS-Klappe	Wasser rosa Durchfluß mittels MID nur Stellung
21.07.98	99c219d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 2; VHS; P05 vor RS-Klappe	Wasser rosa Durchfluß mittels MID nur Stellung
21.07.98	99c220d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: Glasrohr; RS-Klappe Pos. 2; VHS; P05 vor RS-Klappe	Wasser rosa Durchfluß mittels MID nur Stellung ohne Gittersensor
22.07.98	50c16d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: RS-Klappe Pos. 3;	
22.07.98	50c17d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: RS-Klappe Pos. 3;	RS-Klappe POS.3
22.07.98	50c18d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: RS-Klappe Pos. 3;	langsames Öffnen
22.07.98	66c58d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: RS-Klappe Pos. 3;	RS-Klappe POS.3
22.07.98	66c59d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: RS-Klappe Pos. 3;	RS-Klappe POS.3
22.07.98	66c60d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: RS-Klappe Pos. 3;	langsames Öffnen
22.07.98	99c221d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: RS-Klappe Pos. 3;	RS-Klappe POS.3
22.07.98	99c222d1	zentr. Klappe Pos. 1; mit: RS-Klappe Pos. 3;	RS-Klappe POS.3

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
22.07.98	99c223d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.3;	langsameres Öffnen
22.07.98	132c51d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.3;	
22.07.98	132c52d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.3;	
22.07.98	132c53d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.3;	ohne wire mesh, langsameres Öffnen
22.07.98	165c4dd1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.3;	
22.07.98	165c45d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.3;	
22.07.98	165c46d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.3;	
22.07.98	165c47d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.3;	langsameres Öffnen
23.07.98	132c54d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.3; VHS	
23.07.98	132c55d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.3; VHS	nur wire mesh
23.07.98	132c56d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.3; VHS	
23.07.98	132c57d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.3; VHS	langsameres Öffnen
23.07.98	50c19d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden	GS16; G58;
23.07.98	50c20d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden	GS16; G58;
23.07.98	66c61d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden	GS16; G58; NS bei P03 flackert
23.07.98	66c62d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden	GS16; G58; NS bei P03 flackert
23.07.98	66c63d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden	GS16; G58; NS o.k.

A-31

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
23.07.98	99c226d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden	GS16; G58; NS bei P03 flackert
23.07.98	99c225d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden	GS16; G58; NS bei P03 flackert
23.07.98	99c226d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden	GS16; G58; NS o.k.
23.07.98	132c58d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden	GS16; G58; NS o.k.
23.07.98	132c59d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden	GS16; G58; NS o.k.
23.07.98	165c48d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden	GS16; G58; NS o.k.
23.07.98	165c49d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden	GS16; G58; NS o.k.
24.07.98.1	50c21d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; G58; NS o.k.
24.07.98.1	50c22d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; G58; NS o.k.
24.07.98.1	66c64d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; G58; NS o.k.
24.07.98.1	66c65d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; G58; NS o.k.
24.07.98.1	99c227d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; G58; NS o.k.
24.07.98.1	99c228d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; G58; NS o.k.

A-32

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
24.07.98_1	132c60d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8; NS o.k.
24.07.98_1	132c61d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; VHS; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8; NS o.k.
24.07.98_1	165c50d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8; NS o.k. schnell Schließen; langsam Öffnen
24.07.98_1	165c51d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.4; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8; NS o.k. schnell Schließen; langsam Öffnen
24.07.98_2	50c23d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8;
24.07.98_2	66c66d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8;
24.07.98_2	99c279d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8;
24.07.98_2	132c62d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8;
24.07.98_2	165c52d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8;
24.07.98_3	50c24d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.5; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8;
24.07.98_3	66c67d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.5; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8;
24.07.98_3	99c230d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.5; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8;
24.07.98_3	132c63d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.5; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8;

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
24.07.98_3	132c64d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.5; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8; ohne Wiederöffnung Absturz der Meßdatenerfassung
24.07.98_3	132c65d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.5; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	GS16; GS8; ohne Wiederöffnung
24.07.98_3	165c53d1	zentr. Klappe Pos.1; mit: RS-Klappe Pos.5; 2 wire mesh, Nadelsonden; Bypass	Bypass Brücke; RS-Klappe; POS.5 GS16;GS8;NS
14.08.98	50c25d1	Ventil Pos.2 (Ventil-Kegel Z)	
14.08.98	50c26d1	Ventil Pos.2 (Ventil-Kegel Z)	
14.08.98	66c68d1	Ventil Pos.2 (Ventil-Kegel Z)	
14.08.98	66c69d1	Ventil Pos.2 (Ventil-Kegel Z)	
14.08.98	99c230d1	Ventil Pos.2 (Ventil-Kegel Z)	P15 zu niedrig
14.08.98	99c231d1	Ventil Pos.2 (Ventil-Kegel Z)	P15 zu niedrig
14.08.98	99c232d1	Ventil Pos.2 (Ventil-Kegel Z)	
14.08.98	132c66d1	Ventil Pos.2 (Ventil-Kegel Z)	
14.08.98	132c67d1	Ventil Pos.2 (Ventil-Kegel Z)	P15 zu niedrig
14.08.98	132c68d1	Ventil Pos.2 (Ventil-Kegel Z)	
14.08.98	165c54d1	Ventil Pos.2 (Ventil-Kegel Z)	
14.08.98	165c55d1	Ventil Pos.2 (Ventil-Kegel Z)	
07.09.98	16c09dn5	Klappe Pos.2; DNS50; ohne Kraftaufnehmer	
07.09.98	16c10dn5	Klappe Pos.2; DNS50; ohne Kraftaufnehmer	
07.09.98	25c09dn5	Klappe Pos.2; DNS50; ohne Kraftaufnehmer	
08.09.98	8c06dn5	Klappe Pos.2; DNS50; ohne Kraftaufnehmer	
08.09.98	8c07dn5	Klappe Pos.2; DNS50; ohne Kraftaufnehmer	
08.09.98	25c11dn5	Klappe Pos.2; DNS50; ohne Kraftaufnehmer	
08.09.98	33c09dn5	Klappe Pos.2; DNS50; ohne Kraftaufnehmer	
08.09.98	33c10dn5	Klappe Pos.2; DNS50; ohne Kraftaufnehmer	
08.09.98	42c10dn5	Klappe Pos.2; DNS50; ohne Kraftaufnehmer	

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
08.09.98	42c11dhs	Klappe Pos.2; DNS50; ohne Kraltaufnehmer	
14.09.98	132c69d1	zentr. Klappe Pos.1; mit HS-Klappe	DN100
14.09.98	132c70d1	zentr. Klappe Pos.1; mit HS-Klappe	DN100
15.09.98	132c71d1	zentr. Klappe Pos.1; mit HS-Klappe	DN100
29.09.98	8c08dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
29.09.98	8c09dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
29.09.98	16c11dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
29.09.98	16c12dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
29.09.98	25c12dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
29.09.98	25c13dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
29.09.98	33c11dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
29.09.98	33c12dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
29.09.98	42c12dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
29.09.98	42c13dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
29.09.98	42c14dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	Umbau des Kraltaufnehmers
30.09.98	8c10dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
30.09.98	8c11dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
30.09.98	16c13dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
30.09.98	16c14dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
30.09.98	25c14dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	keine Pumpendrehzahl

A-35

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
30.09.98	25c15dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	keine Pumpendrehzahl
30.09.98	33c13dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	keine Pumpendrehzahl
30.09.98	33c14dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
30.09.98	42c15dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
30.09.98	42c16dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
30.09.98	50c01dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
30.09.98	50c02dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	
01.10.98	8c12dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	w/REG=9%
01.10.98	8c13dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	w/REG=9%
01.10.98	16c15dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	w/REG=9%
01.10.98	16c16dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	w/REG=9%
01.10.98	25c16dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	w/REG=9%
01.10.98	25c17dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	w/REG=9%
01.10.98	33c15dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	w/REG=9%
01.10.98	33c16dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	w/REG=9%
01.10.98	42c17dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	w/REG=9%
01.10.98	42c18dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	w/REG=9%
01.10.98	50c03dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	w/REG=9%
01.10.98	50c04dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	w/REG=9%
02.10.98	8c14dh5	Klappe Pos.2; DNS50; mit: Kraltaufnehmer	w/REG=16%

A-36

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
02.10.98	8c15dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=16%
02.10.98	16c17dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=16%
02.10.98	16c18dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=16%
02.10.98	25c18dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=16%
02.10.98	25c19dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=16%
02.10.98	33c16dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=16%
02.10.98	33c17dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=16%
02.10.98	42c19dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=16%
02.10.98	42c20dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=16%
05.10.98	8c16dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=23%
05.10.98	8c17dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=23%
05.10.98	16c19dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=23%
05.10.98	16c20dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=23%
05.10.98	25c20dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=23%
05.10.98	25c21dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=23%
05.10.98	33c18dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=23%
05.10.98	33c19dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=23%
05.10.98	42c21dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=23%
05.10.98	42c22dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=23%
06.10.98	8c18dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=28%

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
06.10.98	8c19dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=28%
06.10.98	16c21dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=28%
06.10.98	16c22dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=28%
06.10.98	25c22dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=28%
06.10.98	25c23dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=28%
06.10.98	33c20dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=28%
06.10.98	33c21dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=28%
06.10.98	42c23dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=28%
06.10.98	42c24dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=28%
06.10.98-1	8c20dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=33%
06.10.98-1	8c21dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=33%
06.10.98-1	16c23dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=33%
06.10.98-1	16c24dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=33%
06.10.98-1	25c24dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=33%
06.10.98-1	25c25dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=33%
06.10.98-1	33c22dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=33%
06.10.98-1	33c23dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=33%
06.10.98-1	42c25dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=33%
06.10.98-1	42c26dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraftaufnehmer	w(PEG)=33%
08.10.98	01dredn1 01stedn1	Klappe Pos.1; DNT100	Öffnungs- und Schließerhalten der Klappe zur Feststellung der Dichtheit der Klappe

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
08.10.98	01drehtn1 01siech1	Klappe Pos.1; DN100	Öffnungs- und Schließverhalten der Klappe zur Feststellung der Dichtigkeit der Klappe
08.10.98	01drehtn1 01siech1	Klappe Pos.1; DN100	Öffnungs- und Schließverhalten der Klappe zur Feststellung der Dichtigkeit der Klappe
08.10.98	01drehtn1 01siech1	Klappe Pos.1; DN100	Öffnungs- und Schließverhalten der Klappe zur Feststellung der Dichtigkeit der Klappe
08.10.98	01drehtn1 01siech1	Klappe Pos.1; DN100	Öffnungs- und Schließverhalten der Klappe zur Feststellung der Dichtigkeit der Klappe
08.10.98	01drehtn1 01siech1	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=37%
26.10.98	8c23dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=37%
26.10.98	16c25dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=37%
26.10.98	16c26dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=37%
26.10.98	25c27dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=37%
26.10.98	25c28dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=37%
26.10.98	33c24dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=37%
26.10.98	33c25dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=37%
26.10.98	42c27dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=37% $V_{max}(100\%)=39m^3/h$
26.10.98	42c28dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=37% $V_{max}(100\%)=39m^3/h$
27.10.98	8c24dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=42%
27.10.98	16c27dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=42%

A-39

Datum	Filename	Versuchsdurchführung	Bemerkungen
27.10.98	16c28dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=42%
27.10.98	25c28dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=42%
27.10.98	25c29dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=42%
27.10.98	33c26dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=42%
27.10.98	33c27dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=42%
27.10.98	42c30dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=42% $V_{max}(100\%)=39m^3/h$
28.10.98	8c26dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=46%
28.10.98	8c27dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=46%
28.10.98	16c29dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=46%
28.10.98	16c30dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=46%
28.10.98	25c30dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=46%
28.10.98	25c31dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=46%
28.10.98	33c28dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=46%
28.10.98	33c29dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=46%
28.10.98	42c31dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=46% $V_{max}(100\%)=38m^3/h$
28.10.98	42c32dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=46% $V_{max}(100\%)=38m^3/h$
30.10.98	8c28dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=50%
30.10.98	8c29dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=50%
30.10.98	16c31dn5	Klappe Pos.2; DNS0; mit: Kraltaufnehmer	wP(EG)=50%

A-40

In dieser Arbeit wird der Einsatz unterschiedlicher Software zur Berechnung von instationären Strömungszuständen von ein- und zweiphasigen Gas-, Dampf- und Flüssigkeitsströmungen in Rohrleitungen bei Umgebungstemperaturen untersucht und anhand folgender praxisrelevanter Szenarien bewertet: schnelles Schließen und Öffnen von Armaturen in flüssigkeitsfördernden Leitungen, schnelle Regelvorgänge von Armaturen, Einströmen von Gas in mit Flüssigkeit leere und teilgefüllte Rohrleitungen.

Es wird ein neues Verfahren zur Ermittlung von Armaturenkennlinien vorgestellt. Hiermit kann die Hydrodynamik in Rohrleitungen erheblich besser vorausberechnet werden. Darüber hinaus wird ein neues Verfahren zur Vermeidung von Druckstößen und Kavitationsschlägen vorgestellt und untersucht.

Fraunhofer UMSICHT ist in verschiedenen Arbeitsgebieten der Umwelt-, Sicherheits-, Prozess- und Energietechnik tätig. Das technisch-wissenschaftliche Institut versteht sich als Schnittstelle zwischen universitärer Forschung und industrieller Praxis. Seine Aufgabe ist die Unterstützung von kleinen und mittleren Betrieben sowie Großunternehmen bei der Entwicklung und Optimierung von technischen Verfahren. Neue, zukunftsweisende Erkenntnisse werden in marktfähige Produkte und Technologien, die zugleich wirtschaftlich und ökologisch vorteilhaft sind, übertragen.