

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

FZR-233

Februar 1999

ISSN 1437-322X

Archiv-Ex.:

Horst-Michael Prasser, Arnd Böttger, Jochen Zschau

**Entwicklung von Zweiphasenmeßtechnik für
vergleichende Untersuchungen zur
Beschreibung von transienten Strömungen in
Rohrleitungen**

Abschlußbericht zum Vorhaben 11ZF9504/1

Herausgeber:
FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF
Postfach 51 01 19
D-01314 Dresden
Telefon +49 351 26 00
Telefax +49 351 2 69 04 61
<http://www.fz-rossendorf.de/>

Als Manuskript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

Horst-Michael Prasser, Arnd Böttger, Jochen Zschau

**Entwicklung von Zweiphasenmeßtechnik für
vergleichende Untersuchungen zur
Beschreibung von transienten Strömungen in
Rohrleitungen**

Abschlußbericht zum Vorhaben 11ZF9504/1

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 11ZF9504/1 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Zielstellung	4
3	Darstellung der Druckstoßanlage	5
3.1	Aufbau der Versuchsanlage	5
3.2	Versuchsinstrumentierung	8
4.	FZR-Meßtechnik	9
4.1	Darstellung der vom FZR installierten Meßtechnik	10
4.1.1	Leitfähigkeitsmeßtechnik (Hardware)	10
4.1.2	Ultraschallmeßtechnik (Hardware)	21
4.1.3	Firmware für die Leitfähigkeits- und Ultraschallmeßtechnik	22
4.2	Datenübertragungsstrecke	25
5	Meßwertverarbeitung und Kalibrierung	27
5.1	Auswertesoftware	27
5.1.1	Verarbeitung der Gittersensor-Signale	27
5.1.2	Verarbeitung der Nadelsonden-Signale	32
5.1.3	Verarbeitung der Ultraschall-Signale	33
5.2	Kalibrierung an der Zweiphasen-Testschleife	33
5.2.1	Testschleife und Versuchsregime	33
5.2.2	Ermittlung der Meßgenauigkeit der Nadelsonden	35
5.2.3	Ermittlung der Meßgenauigkeit der Gittersensoren	36
5.2.4	Ermittlung der Meßgenauigkeit des Drahtgittersensors	37
5.2.5	Kalibrierung der Ultraschallaufnehmer	37

6	Ergebnisse der Schnellschlußversuche	40
6.1	Systematik der Schnellschlußversuche	40
6.2	Kavitation hinter der schnellschließenden Klappe	41
6.2.1	Klappe im vorderen Teil der Rohrleitung DN100 mit Rohrbrücke	41
6.2.2	Versuche mit Bypass der Rohrbrücke	51
6.2.3	Klappe am Ende der Rohrleitung DN100	53
6.2.4	Ausdehnung und Lebensdauer der ersten Kavitationsblase	53
6.3	Kavitation in unmittelbarer Umgebung der schnellschließenden Klappe	62
6.3.1	Klappe im Vorlauf der Leitung DN50	62
6.3.2	Klappe im Rücklauf der Leitung DN50	64
6.4	Zudosierung von Luft	66
6.5	Verringerung der Schließgeschwindigkeit	69
6.6	Teilschlußversuche	71
6.7	Bewertung der Ultraschallmessungen	75
7	Zusammenfassung	78
8	Anhang	82
8.1	Literatur	82
8.2	Formelzeichen	83
8.3	Glossar	85
8.4	Bilderverzeichnis	86
8.5	Tabellenverzeichnis	90
8.6	Zeitlicher Ablauf des Vorhabens	91
8.7	Arbeitsplan	92

1 Einleitung

Für die Untersuchung von transienten Zweiphasenströmungen in Rohrleitungen, bzw. Rohrleitungssegmenten wurden im Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik e.V. Oberhausen (UMSICHT) eine Druckstoßanlage als Freiluftanlage errichtet. Diese Anlage besteht aus zwei ca. 200 m langen Rohrleitungen mit den Nennweiten DN50 und DN100. Beide Rohrleitungen sind segmentiert aufgebaut und daher für die Untersuchung verschiedenster Rohrleitungskomponenten bei einphasigen kavitierenden Fluiden und zweiphasigen Medien bei unterschiedlichen Betriebsparametern variabel konfigurierbar. Zur experimentellen Beschreibung der Druckstoßphänomene wurde die Anlage neben der Betriebsinstrumentierung zur Einstellung der Betriebsparameter von UMSICHT mit Druck- und Kraftmeßgebern ausgerüstet.

Aufgabe des FZR war die Instrumentierung der Anlage mit Zweiphasenmeßtechnik bestehend aus Leitfähigkeits- und Ultraschallmeßtechnik sowie der Mitwirkung bei den experimentellen Untersuchungen und deren Interpretation. Dazu wurde die Anlage vom FZR mit 16 nadelförmigen Leitfähigkeitssonden, einem neuartigen Gittersensor-Meßsystem und Ultraschall-Aufnehmern ausgerüstet.

In dem Bericht wird die eingesetzte Meßtechnik und deren Erprobung an der Rosendorfer Versuchsschleife, sowie der Einsatz an der Anlage in Oberhausen beschrieben. Anhand in Zusammenarbeit mit UMSICHT durchgeführter ausgewählter Versuchsreihen werden die Experimentergebnisse dargestellt und interpretiert. Weiterhin wird der Erkenntnisgewinn bei der Interpretation von druckwelleninduzierten Verdampfungs- und Kavitationsvorgängen sowie ein vergleichender Überblick über die Eignung der eingesetzten Meßtechnik gezeigt.

Die erfolgreiche Bearbeitung des Projektes basierte in sehr hohem Maße auf der guten Zusammenarbeit mit dem UMSICHT-Institut. Die Autoren dieses Berichts möchten den beteiligten Mitarbeitern von UMSICHT hierfür herzlich danken.

2 Zielstellung

Für die Untersuchung von transienten Zweiphasenströmungen in Rohrleitungen spielt die Ausrüstung der Versuchsstrecke mit geeigneter Meßtechnik eine entscheidende Rolle. Die hohe Änderungsgeschwindigkeit der dabei ablaufenden instationären druckwelleninduzierter Verdampfungs- und Kavitationsvorgänge erfordert eine zeitliche Auflösung der eingesetzten Meßverfahren im Millisekundenbereich. Zur Erächtigung existierender theoretischer Modelle für die Berechnung der Vorgänge in Zweiphasenströmung ist die simultane zweidimensionale Messung und Visualisierung der Dampf- bzw. Gasgehaltsverteilung über den Rohrquerschnitt mit hoher Meßfolge notwendig. In der Entwicklung und der anwendungsbereiten Installation dieser speziellen Meßtechnik an der im Rahmen eines Parallelprojektes im Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik e.V. Oberhausen errichteten Druckstoßanlage bestand die wesentliche Forschungs- und Entwicklungsaufgabe des Vorhabens.

Die experimentellen Untersuchungen sollten mit Leitfähigkeits- und Ultraschallmeßtechnik durchgeführt werden. Dabei war zunächst von den Erfahrungen des Antrag-

stellers auf dem Gebiet der Zweiphasenmeßtechnik ausgehend, an den Einsatz von geometrisch verteilter simultan messender Nadelsondenensembles gedacht. Das Ultraschall-Meßverfahren sollte bei höheren mechanischen Belastungen der Sensoren eingesetzt werden. Zur Messung der räumlichen Verteilung der sich schnell ändernden Gasgehaltsverteilungen in den Rohrleitungen sollten die Sensoren an verschiedenen, räumlich interessanten Meßpunkten eingesetzt, die Versuche mit gleichen Parametern wiederholt und die Meßergebnisse der einzelnen Versuche phasenrichtig überlagert werden. Mehrfaches Wiederholen der Versuchszyklen mit anschließender Ensemble-Mittelung sollte die Meßergebnisse statistisch sichern.

In der Vorbereitungsphase bei der Konzipierung der Meßtechnik wurde zusätzlich zu den Projektvorgaben die Entwicklung eines Gittersensor-Meßsystems bis zur Einsatzreife in das Vorhaben eingebracht. Die Übertragung der bis dahin im FZR mit der Nadelsondenmeßtechnik gesammelten Erfahrungen auf das bekannte, aber bisher nur bedingt anwendbare Gittersensormeßprinzip ließ einen großen Erkenntniszuwachs speziell für die Visualisierung von Kavitationsvorgängen erwarten.

Mit den zu entwickelnden Meßverfahren sollten einerseits die experimentellen Untersuchungen an transienten Zweiphasenströmungen erweitert werden, um damit die Voraussetzungen für die Überprüfung verfügbarer Rechencodes zu schaffen und um verbesserte Modelle und Codes realisieren zu können. Andererseits sollten die Versuchsergebnisse zu einer sichereren Auslegung großtechnischer druckbelasteter Komponenten und damit zu einer Vermeidung von Störfällen führen.

3 Darstellung der Druckstoßanlage

3.1 Aufbau der Versuchsanlage

Die im Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik e.V. Oberhausen als Freiluftanlage errichtete Druckstoßanlage zeigt Bild 3.1. Die Anlage besteht aus zwei ca. 200 m langen Edelstahlrohrleitungen der Nennweiten DN50 und DN100 mit einem Wendepunkt bei ca. 100 m. Am Kopf der Anlage befinden sich Vorrats- und Auffangbehälter für das Fluid sowie die Pumpen und ein Teil der Pumpensteuerung. Letztere sind in einem Container untergebracht. Etwa in der Hälfte sind die Rohrleitungen über eine ca. 10 m hohe Rohrbrücke geführt. In den Rücklaufstrecken befinden sich an dieser Stelle geneigte Leitungsabschnitte, die einen Hochpunkt bilden.

Beide Rohrleitungen bestehen aus einer Vielzahl miteinander verschraubter Rohrsegmente, so daß ein leichtes Austauschen bestimmter Rohrabschnitte gegen zu untersuchende Elemente (z.B. Ventile und Klappen), Segmente mit spezieller Geometrie (Tiefpunkte, Bypass der Rohrbrücke) oder Meßtechnik und Glasrohre zur Visualisierung der Strömungsformen möglich ist. Die Rohrleitungssegmente sind auf im Erdreich verankerten Fundamenten gleitend gelagert, so daß sie sich unter Einwirkung von druckwellenbedingter Verdampfungs- und Kavitationsvorgängen in Rohrleitungsrichtung begrenzt bewegen können, eine Bewegung senkrecht dazu wird jedoch durch die Lager verhindert. Die wichtigsten technischen Daten der Anlage sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Die Anlage verfügt über eine Betriebsinstrumentierung zum Einstellen der variablen Betriebsparameter, die sich teils in dem Container, teils in einer Technikumshalle befindet, die sich zum nächstgelegenen Punkt der Anlage in einem Abstand von etwa 40 m befindet.

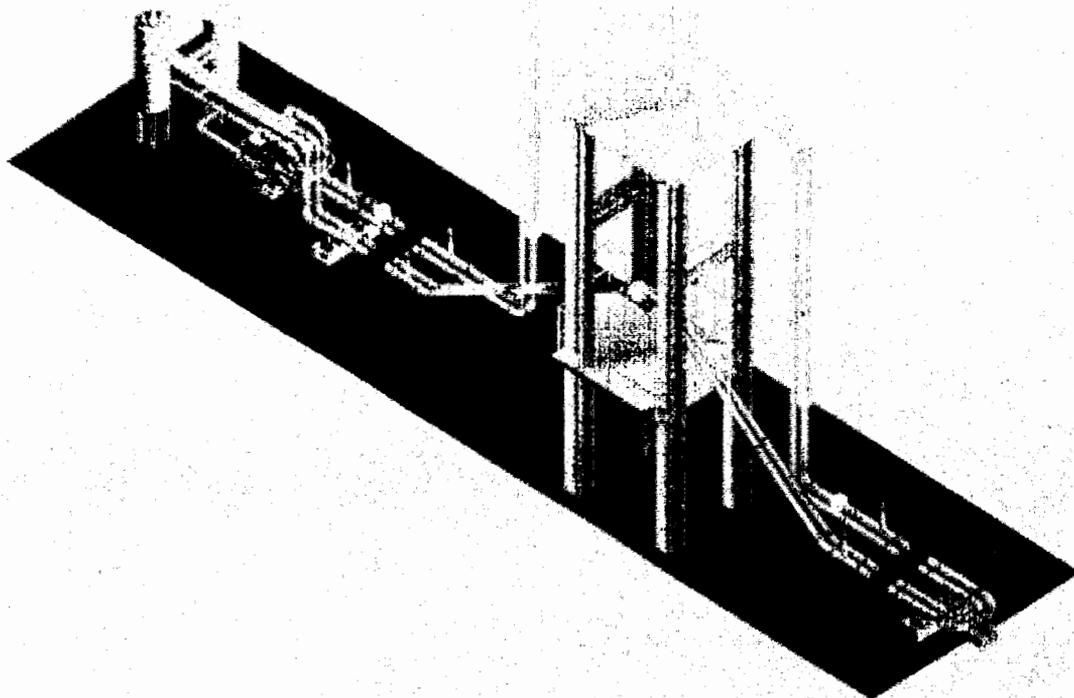


Bild 3.1 Perspektivische Ansicht der Druckstoßanlage im Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik e.V. Oberhausen

In der Meßwarte wurden auch die Rechner für die Meßwerterfassung aufgestellt, sofern nicht direkt vor Ort an der Anlage gemessen wurde. Die Kombination der Anlagenteile Druckbehälter, Auffangbehälter, Durchlauferhitzer, Kompressor und Kreiselpumpen ermöglichen die unterschiedlichen Betriebsweisen:

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

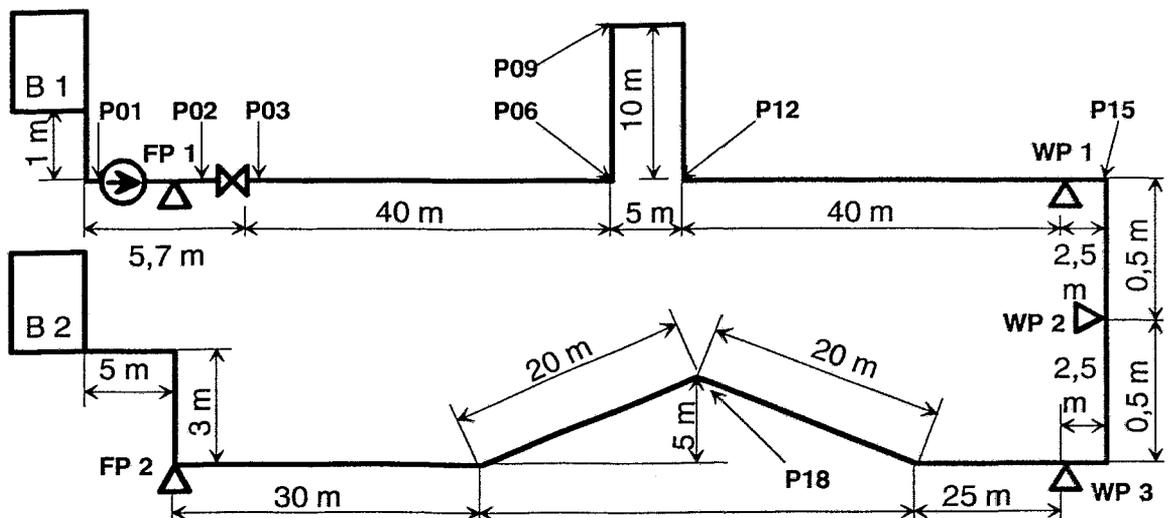


Bild 3.2. Meßpositionen der Kraft- und Druckaufnehmer an der Druckstoßanlage, P0X= Druckaufnehmer; WPX, FPX= Kraftaufnehmer

Tabelle 3.1 Charakteristische Anlagendaten der Druckstoßanlage in Oberhausen

Meßleitungen	
Gesamtlänge	225 m
Länge ohne Rohrbrücke	200 m
Durchmesser [mm]	60,3x3; 114,3x3
Material	Edelstahl 1.4571
p_{\max} 20°C	DN 50: 141bar
	DN 100: 79 bar
p_{\max} 100° C	DN 50: 117bar
	DN 100: 65 bar
Behälter	
Behälter 1 (B 1)	2,0 m ³ 40 bar
Behälter 2 (B 2)	3,0 m ³ atm

Rohrbrücke	
Höhe x Länge	10 x 6 m
Pumpen	
Kreiselpumpe 1	50 m ³ /h 14 bar
Kreiselpumpe 2	185 m ³ /h 5,5 bar
Durchlauferhitzer	
Durchlauferhitzer	50 kW 95° C

3.2 Versuchsinstrumentierung

Unter Versuchsinstrumentierung wird hier nur die Ausrüstung der Anlage mit Sensoren, Meßwertumformern und Meßwerterfassungstechnik verstanden, die zur Erfassung der Meßdaten bei der Versuchsdurchführung dient und nicht die projektmäßige Betriebsinstrumentierung zum Einstellen der Versuchsparameter.

Ursprünglich war der Standort der Anlage in einer Halle vorgesehen, so daß keine speziellen Vorkehrungen zur Klimatisierung der Meßtechnik und zur Meßdatenübertragung notwendig waren. Sensoren, Meßwertumformer und PC als Meßwerterfassungseinheit hätten dabei direkt am Meßort stationiert werden können. Die Steuerung der einzelnen PC wäre über ein vom Anlagenbetrieb abgeleitetes Startsignal synchronisiert worden. Infolge der zeitlich verzögerten Bewilligung des Projektes im Dezember 1995 und der verspäteten Fertigstellung der Druckstoßanlage bei UMSICHT Oberhausen als Freiluftanlage mit für die Meßtechnik veränderten Einsatzbedingungen war diese Meßtechnikkonzeption nicht mehr realisierbar. Dies betraf vor allem die vom FZR bereitzustellende Meßtechnik, da der von UMSICHT projektierte Einsatz der Druck- und Kraftmeßtechnik bereits gleitend mit der Anlagenprojektierung den veränderten Aufstellungsbedingungen angepaßt werden konnte.

Zum Zeitpunkt der Antragstellung des Projektes, im Mai 1994, wurde auf die meßtechnische Realisierung des Projektes mittels nadelförmiger Leitfähigkeitssonden und Ultraschallverfahren orientiert. Erst nach der Besichtigung der im Bau befindlichen Anlage und der Absprache des konkreten Meßprogramms im Dezember 1996 in Oberhausen konnte die vorbereitete und im FZR bereits erprobte Meßtechnik für den geplanten Einsatz umgerüstet werden. Neben der Anpassung an die veränderten klimatischen Bedingungen erfolgte eine weitestgehende Berücksichtigung des zwischenzeitlich erfolgten technischen Fortschritts, was teilweise zu über den ursprünglichen Projektumfang hinausgehenden Neuentwicklungen führte.

Vom FZR wurden dabei folgende Gerätesysteme entwickelt bzw. bereitgestellt, an der Rossendorfer Testschleife erprobt und in Oberhausen installiert:

1. 4 Stück

4-Kanal-Nadelsonden-Module mit je 4 druckfesten Nadelsonden,

2. 1 Stück

Gittersensor-Meßsystem mit je einem druckfesten Sensor DN100 mit 2 x 16 und 2 x 8 Elektroden, sowie zwei druckfesten Sensoren DN50 mit jeweils 2 x 8 Elektroden,

3. 1 Stück

3-Kanal-Ultraschall-Meßsystem mit Meßumformer, Datenanpassungs- und Übertragungseinheit sowie 3 Ultraschallsensorpaaren (jeweils Reflektions- und Durchschallungssensor).

Diese Meßtechnik sollte nach den Absprachen vom Dezember 96 vorrangig in der Umgebung der Rohrbrücke eingesetzt werden, daher wurde bedingt durch die begrenzten Kabellängen zwischen Sensoren und Meßwertumformer auf der Meßbrücke ein klimatisierter Schaltschrank zur Aufnahme der Meßwertumformer installiert. Die dadurch notwendige Übertragung der Daten zur Erfassung und Auswertung zu den PCs in der Meßwarte erfolgt über eine neuinstallierte ca. 100 m lange Lichtleiter-Datenübertragungsstrecke. Im praktischen Versuchsbetrieb zeigte es sich, daß diese feste Lokalisierung der Sensoren nicht immer sinnvoll war, so daß die Meßtechnik operativ an die jeweilig interessanten Einsatzorte umgesetzt wurde und damit die Datenübertragung und der Schutz der Meßtechnik vor Klimaeinflüssen operativ zu lösen war.

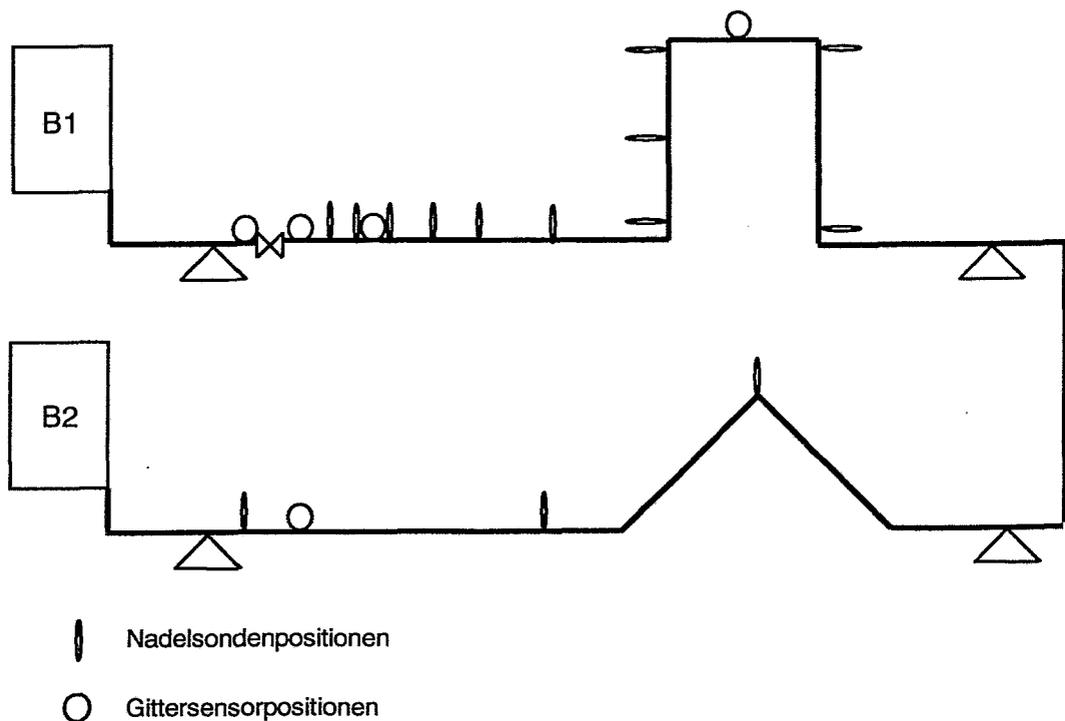
4 FZR-Meßtechnik

Für die Einsatzbedingungen der gesamten Meßtechnik gab es bezüglich der technischen Parameter keine Festlegungen in Form eines Pflichtenheftes. Es existierten lediglich die allgemeine Forderungen:

- Arbeitsfähigkeit der Meßtechnik unter Freiluftbedingungen,
- Nennweite der Rohrleitungen 50 und 100 mm,
- Leitfähigkeit des Mediums ca. 400 -1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Leitungswasser),
- Arbeitstemperaturbereich für die Sensoren 0° - 80° C,
- zeitliche Auflösung der Meßwerte im Millisekundenbereich.

Als weitere Aussage war durch Berechnungen abgeschätzt worden, daß die zu erwartenden Maximalwerte der Druckspitzen während der Kavitationsschläge ca. 35-40 bar erreichen können.

Die Platzierung der FZR-Meßtechnik an der UMSICHT-Anlage ist aus Bild 4.1 ersichtlich.



Die konkreten Sensorpositionen werden bei der Beschreibung der jeweiligen Versuche angegeben.

Bild 4.1 Übersicht über den schwerpunktmäßigen Einsatz der FZR Meßtechnik in der UMSICHT-Anlage

4.1 Darstellung der vom FZR installierten Meßtechnik

4.1.1 Leitfähigkeitsmeßtechnik (Hardware)

Nadelsonden

Die Hardware eines Nadelsonden-Meßsystems besteht aus den druckfesten Nadelsonden und der Meßwerterfassungselektronik. Die Nadelsonden sind über Swagelok-Verschraubungen installiert. Bild 4.2 zeigt das Strukturbild eines Nadelsonden-Meßsystems.

Von dem Vorverstärker wird die Sonde mit einer Ansteuerspannung versorgt und gleichzeitig der dadurch fließende Strom als Maß für die lokale Leitfähigkeit in unmittelbarer Umgebung der Sondenspitze gemessen.

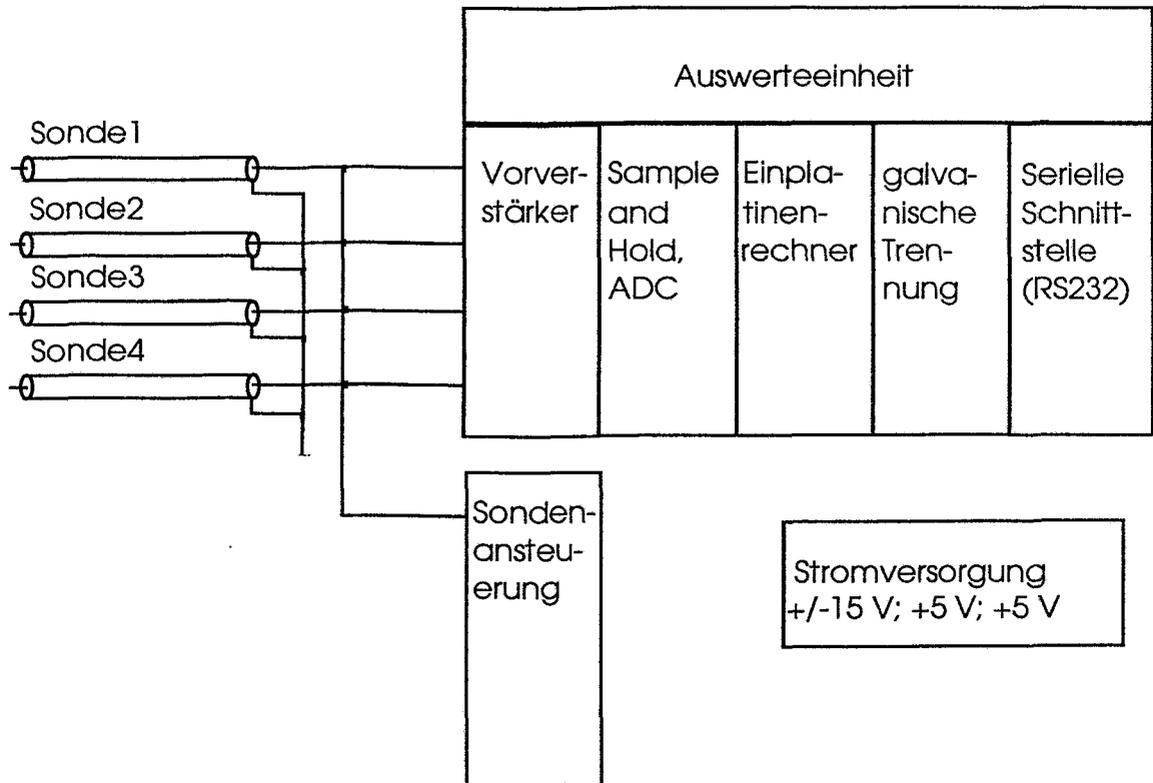


Bild 4.2 Strukturbild des Nadelsonden-Meßsystems

Das Funktionsprinzip der Sonde zusammen mit der Vorverstärkerstufe ist aus Bild 4.3 ersichtlich. Die Nadelsonde besteht aus den zwei koaxial angeordneten Elektroden E1 und E2. Zur Bestimmung der Leitfähigkeit in der unmittelbaren Umgebung der Sondenspitze wird an die Mittelelektrode E1 der Sonde durch den Verstärker OPV 1 eine Spannung angelegt und gleichzeitig mit OPV 1 der Strom I1 gemessen, der von der Mittelelektrode E1 zu der auf Massepotential liegenden Elektrode E2 fließt. Die Beschaltung des Verstärkers OPV 2 bewirkt, daß Spannung U1 am Ausgang von OPV 2 proportional diesem Strom I1 ist. Für die Dauer der Analog/Digitalwandlung durch den ADC wird diese analoge Spannung mittels einer Sample- and Holdschaltung konstant gehalten. Ein Einkartenrechner speichert die digitalisierten Spannungswerte in seinem Arbeitsspeicher. Je nach eingesetztem Programm kann durch den Einkartenrechner eine Meßwertbearbeitung, bzw. -verdichtung vorgenommen werden. Die Übertragung der Daten von dem Einkartenrechner zu dem meßwertverarbeitenden PC erfolgt über eine serielle RS232-Schnittstelle. Zur Vermeidung von Ausgleichsströmen infolge unterschiedlichen Potentials von Anlage und PC erfolgt eine galvanische Trennung zwischen Meßwertfassungselektronik und PC.

Für den Bau und den Betrieb der Nadelsonden kam es besonders auf möglichst hohe Druckfestigkeit der Sonden an. Für den Einsatz der Sonden und der dazugehörigen Elektronik in der UMSICHT-Anlage konnten die im FZR existieren umfangrei-

chen Erfahrungen [1], [2], [5] genutzt werden. Konkrete Angaben darüber existierten zum Zeitpunkt der Sondenkonstruktion jedoch nicht.

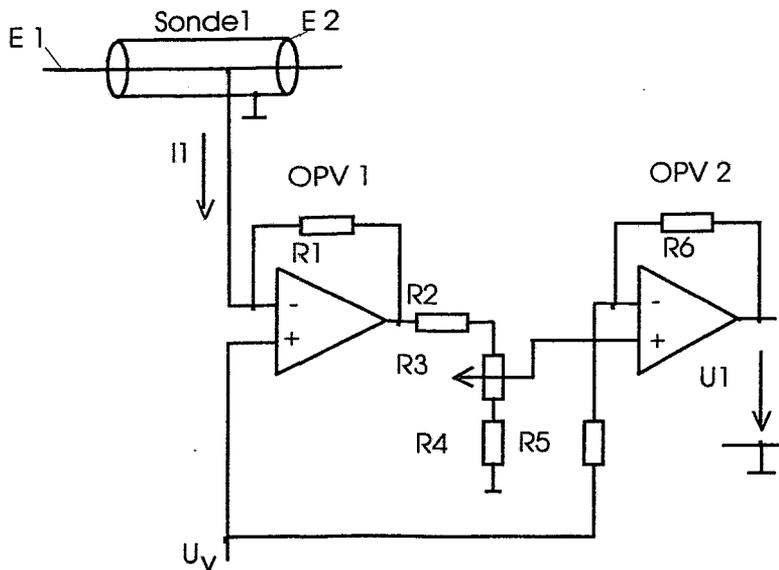


Bild 4.3 Prinzipschaltbild der Nadelsondenansteuerung und Meßwertgewinnung

Das Nadelsonden-Meßsystem (Bild 4.6) wurde völlig neu überarbeitet, um neben der Druckfestigkeit der Nadelsonden weitere neue technische Verbesserungen einzuarbeiten. Neben den Sonden wurde ein vierkanaliges Ansteuer- und Auswertemodul entwickelt, das in seiner konstruktiven Gestaltung für einen industrienahen Einsatz geeignet ist. Als Gehäuse wurde dabei ein Aluminiumdruckgußgehäuse der Abmessungen (BxTxH) von 260x180x128 mm eingesetzt.

Während der Messung kann es bei einer Sondenkonstruktion nach Bild 4.3 vorkommen, daß sich Flüssigkeitsfilme, Ablagerungen bzw. Bläschen zwischen den beiden Elektroden E1 und E2 bilden, die zu einer Verfälschung des Meßergebnisses führen. Die neuentwickelten druckfesten Nadelsonden [5] wurden daher zusätzlich mit einer dritten Elektrode E3 ausgestattet (Bild 4.5), die so angeschlossen ist, daß sie bei genügend hoher innerer Verstärkung von OPV 1 auf dem Potential der Elektrode E1 liegt. Damit sind Flüssigkeitsfilme, Ablagerungen bzw. Bläschen zwischen diesen beiden Elektroden wirkungslos, da infolge gleichen Potentials von E1 und E3 zwischen beiden Elektroden kein Strom fließen kann. Die Sonde gestattet dadurch eine höhere Meßgenauigkeit.

Ein wesentliches Merkmal des Meßverfahrens ist die Ansteuerung der Sonden durch eine Wechselfspannung. Sie dient der Verhinderung von Polarisierungseffekten, die zu einer Verfälschung der gemessenen Leitfähigkeit in der Umgebung der Sondenspitze führen würden. Weiterhin besteht bei einem lang andauerndem Gleichspannungsbetrieb die Gefahr von anodischer Korrosion. Die Sonde wird deshalb mit ei-

nem bipolaren, symmetrischen Rechteckimpuls angesteuert, weil durch das Wechselfeld Elektrolysevorgänge vermieden werden.

Bei der Meßsignalgewinnung wird die dem Stromsignal I_1 proportionale Spannung U_1 erst kurz vor dem Umschaltzeitpunkt von der positiven zur negativen Halbwelle von U_v durch die Sample- and Hold Schaltung übernommen, wenn der durch die komplexen Widerstandsanteile hervorgerufene Einschwingvorgang abgeklungen ist. Dadurch wird die minimale Impulsdauer des Ansteuerimpulses der Sonde bestimmt. Zur optimale Anpassung an die Meßaufgabe ist die Impulsdauer programmierbar.



Bild 4.4 Druckfeste Dreielektroden-Nadelsonde mit Signalkabel

Ein speziell konzipierter anwenderspezifischer Schaltkreis steuert den Meßablauf und teilt einem Einkartenrechner die Gültigkeit der Meßwerte mit. Der Einkartenrechner MEGA 340 der Firma MCT Berlin realisiert die AD-Umsetzung, Abspeicherung und Übertragung der Daten an einen PC. Dazu besitzt der MEGA 340 einen vierkanaligen AD-Umsetzer mit 12 bit Auflösung bei einer Wandlungszeit von ca. $10 \mu\text{s}$ pro Kanal. Über eine serielle, galvanisch getrennte RS232 Schnittstelle realisiert er die Datenübertragung mit 38,4 kbit/s zu dem PC. Weitere technische Daten des Nadelsonden-Meßsystems kann man dem Datenblatt im Anhang entnehmen.

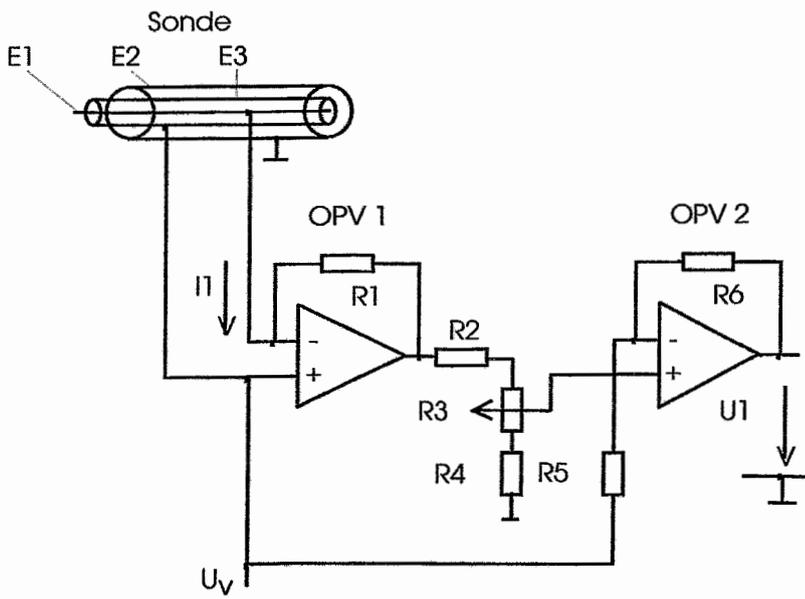


Bild 4.5 Prinzipbild einer Dreielektroden-Nadelsonde mit Vorverstärker



Bild 4.6 4-Kanal-Nadelsonden-Meßsystem mit Nadelsonde

Gittersensor-Meßsystem

Der Stand der Technik auf diesem Gebiet wurde zu Beginn durch Entwicklungen aus den USA [5] und Deutschland [6] bestimmt. Eine intensive Beschäftigung mit dem Gittersensor-Meßprinzip und die Übertragung der mit den Nadelsonden gemachten Erfahrungen führte im FZR zu einer neuen Realisierungskonzeption.

Die Gittersensoren bestehen aus zwei oder drei Ebenen paralleler Elektrodendrähte oder -stäbchen. Diese Ebenen sind in kurzem Abstand in Strömungsrichtung hintereinander angeordnet. Die Elektroden der einzelnen Ebenen sind gegeneinander um einen bestimmten Winkel verdreht. Als Maß für die Leitfähigkeit dient der Stromeintrag auf eine oder mehrere Elektroden (Empfängerelektroden), herrührend von einer mit einer Spannung beaufschlagter Erregerelektrode (Senderelektroden). Der Sensor in [5] arbeitet mit zwei um 90° verdrehten Ebenen, indem nacheinander das Vorhandensein einer leitfähigen Phase (z.B. Wasser) an allen Kreuzungspunkten abgefragt wird. Aus der Anzahl der von Wasser umgebenen Kreuzungspunkten erhält man den momentanen volumetrischen Phasenanteil, eine Auswertung der Verteilung über den gemessenen Querschnitt erfolgt nicht. Problematisch ist weiterhin das Übersprechen zwischen parallelen Elektroden, das keine quantitative Bestimmung der lokalen Leitfähigkeiten zuließ.

Der Sensor der Universität Hannover/Institut für Verfahrenstechnik [7] besteht aus drei Elektrodenebenen mit jeweils 120° Verdrehung zueinander. Gemessen wird jeweils die mittlere Leitfähigkeit zwischen zwei benachbarten parallel verlaufenden Elektroden. Auf diese Weise werden drei Projektionen des über die entsprechenden Sehnen gemittelten Gasanteils bestimmt, aus denen mit Hilfe von tomographischen Bildrekonstruktionsverfahren die Verteilung im Strömungsquerschnitt zurückgerechnet wird. Da hierbei ein stark unterbestimmtes Gleichungssystem mit Randbedingungen zu lösen ist, treten Artefakte bei der Visualisierung und entsprechende Meßfehler in den Verteilungen auf. Der Bildrekonstruktionsalgorithmus erfordert äußerst umfangreiche Berechnungen, die die Auswertung kompliziert gestalten. Die erreichte Zeitauflösung beträgt ca. 100 Bilder/s.

Aufbauend auf diesen Stand wurde im FZR ein Gittersensor entwickelt, der auf dem Sensordesign von [6] basiert, dabei jedoch über eine neuartige Methode zur Ansteuerung der Elektroden und der Signalauswertung verfügt, die eine Bestimmung der momentanen Gasgehaltsverteilung im Rohrleitungsquerschnitt gestattet. Die Elektroden der ersten Ebene (Senderebene) werden durch eine Multiplexschaltung zeitlich nacheinander mit kurzen Spannungsimpulsen versorgt. Durch die Spannung, die an eine der Sendeelektroden angelegt wird, tritt an jeder einzelnen Elektrode der zweiten Ebene (Empfängerebene) ein Strom auf, der zur mittleren Leitfähigkeit des Meßmediums in der Umgebung des Kreuzungspunkts der beiden Elektroden proportional ist. Aus dem Wert des empfangenen Stroms wird der lokale volumetrische Gasanteil ermittelt. Die summarische Betrachtung aller lokalen Leitfähigkeiten ergibt die Leitfähigkeitsverteilung über den betrachteten Querschnitt, eine tomographische Bildrekonstruktion, wie bei [6], ist nicht erforderlich, wodurch Artefakte ausgeschlossen sind. Die neuentwickelte Ansteuer- und Auswerteelektronik erlaubt derzeit eine Messung mit einer Bildfrequenz von 1024 Hz bei 16×16 Meßpunkten, letzteres entspricht z.B. in einer Rohrleitung von 100 mm Innendurchmesser (DN100) einer räumlichen Auflösung von ca. 6 mm. Hinsichtlich der Meßfrequenz wird das in [6] beschriebene Verfahren etwa um den Faktor 10 überboten. Für diese Methode zur

Ansteuerung der Elektroden und der Signalauswertung wurde eine Patentanmeldung [8] eingereicht.

Im FZR wurde 1996 ein Prototyp (Bild 4.12) eines Gittersensor-Meßsystems aufgebaut und mit Laborsensoren der DN50 erfolgreich an der Rossendorfer Zweiphasen-Testschleife erprobt. Als Elektrodenmaterial wurde hierbei V2A-Draht mit 0,12 mm Durchmesser verwendet.

Aufgrund der guten Erprobungsergebnisse [9], [10] wurde der Einsatz eines solchen Meßsystems im Rahmen des Projektes in der UMSICHT-Versuchsanlage vorgeschlagen, da mit dem Gittersensoren gegenüber nadelförmiger Leitfähigkeitssonden eine Visualisierung der Leitfähigkeitsverteilung über einen bestimmten Querschnitt möglich ist. Bild 4.8. zeigt des Organisationsprinzip des Gittersensor-Meßsystems. Für den praktischen Einsatz wurden je ein druckfester Sensoren der DN100 mit 2 x 16 und 2 x 8 Elektroden und zwei druckfeste Sensor der DN50 mit jeweils 2 x 8 Elektroden entwickelt und eingesetzt. Als Elektroden wurden dabei strömungsgünstig optimierte V2A-Stäbchen mit linsenförmigen Querschnitt eingesetzt, die im V2A-Grundkörper mit temperaturfestem Epoxydharz eingeklebt wurden. Bild 4.10 zeigt den druckfesten Sensor mit 16x16 Elektroden der DN100 .

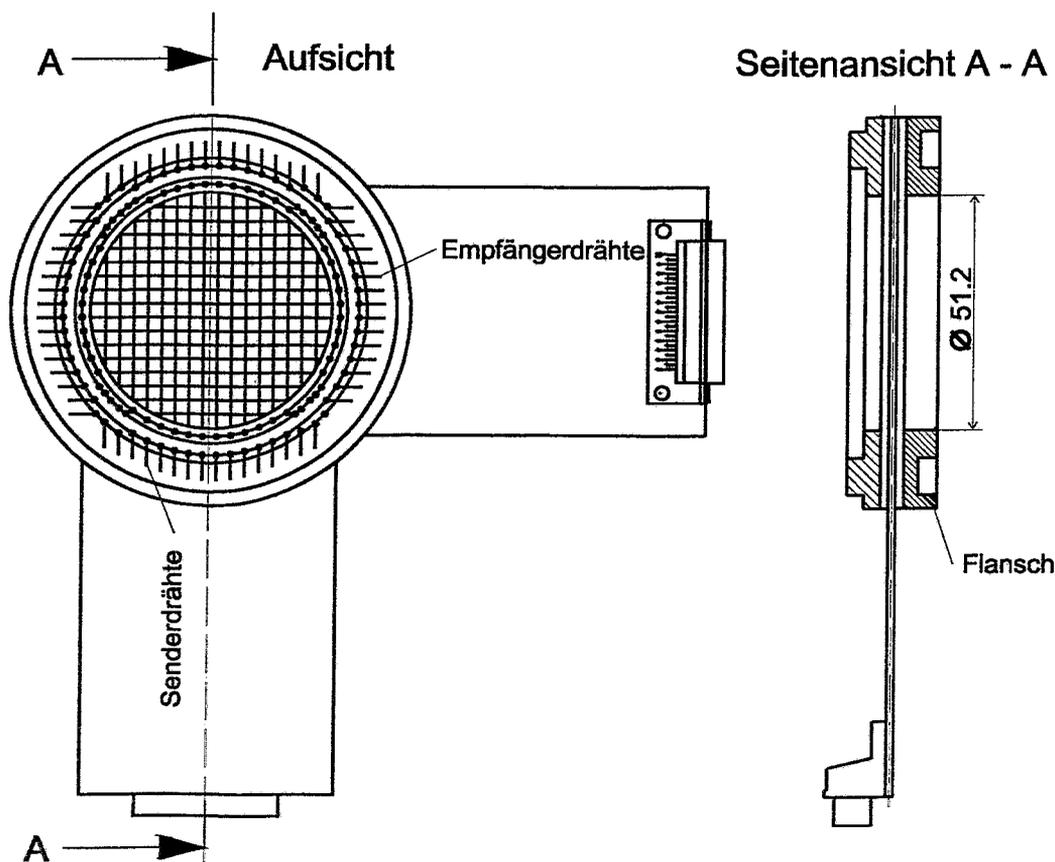


Bild 4.7 Laborgittersensor mit 2 x 16 Elektrodenstrahlen von 0,12 mm Durchmesser

Die Elektronik (Bild 4.12) erlaubt wahlweise den synchronen Betrieb von 2 Sensoren mit 2 x 8 Elektroden oder von einem Sensor mit 2 x 16 Elektroden. Sie ist modular aufgebaut und in einem 19" Gehäuse halber Breite untergebracht.

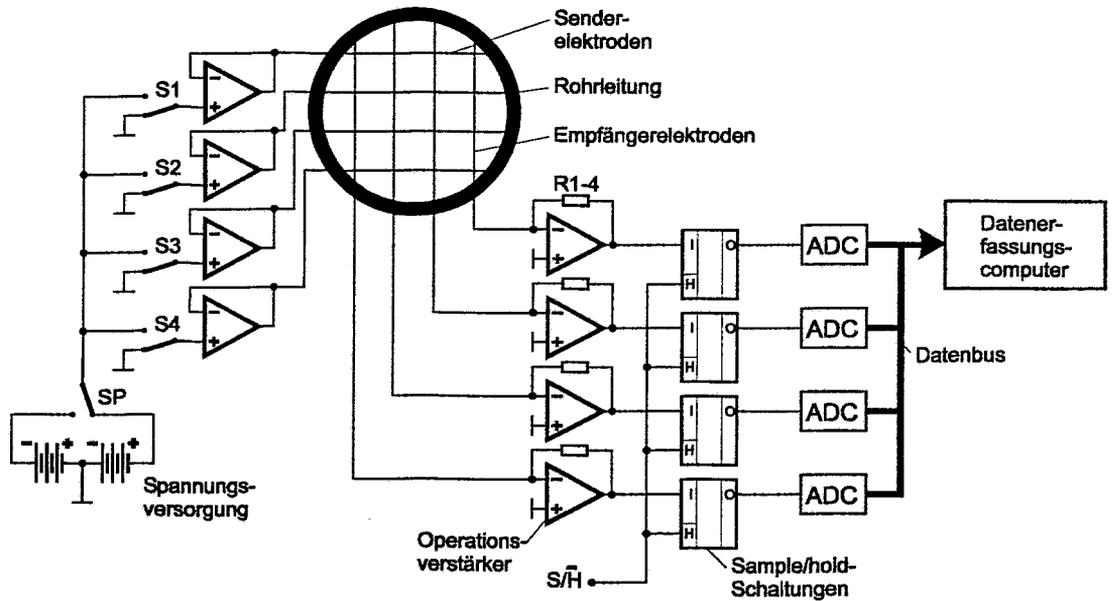


Bild 4.8 Vereinfachtes Strukturbild des Gittersensor-Meßsystems.

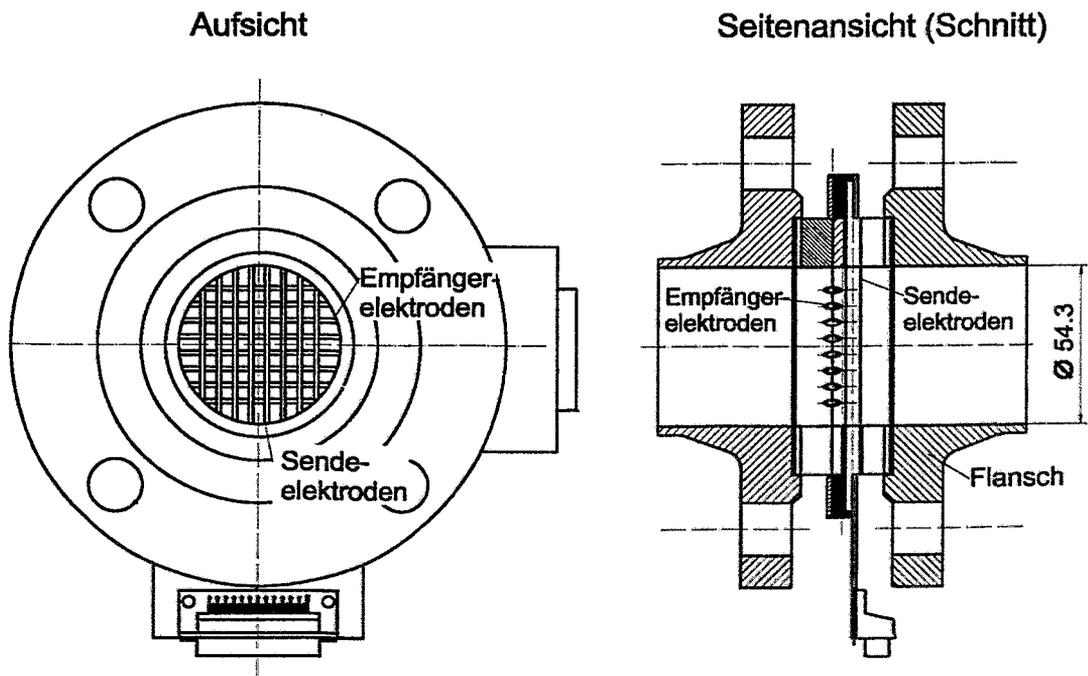


Bild 4.9 Druckfester Sensor DN100 für den industriellen Einsatz mit 2 x 8 Elektroden

Ein Modul realisiert die 16 Sendestufen für Erregerelektroden, vier weitere Module mit Strom-Spannungswandlern, programmierbarer Vorverstärkung, Sample- and Holdschaltungen und je einem Einkartenrechner übernehmen die Signalauswertung. Die Einkartenrechner integrieren den Prozessor MC 68340 von Motorola (25 MHz, 4 MByte Speicher), einen vierkanaligen ADC mit ca. 10 μ s Umsetzzeit pro Kanal, 2 MB EPROM oder 2 MB Flash-EPROM, 4 MB statischen RAM und serielle RS232-Schnittstelle. Jeder dieser Module übernimmt die Auswertung von vier Empfangsdrähten. Alle fünf Module werden von einem Rohspannungsmodul versorgt. Die eigentlichen Betriebsspannungen werden auf den Modulen durch DC/DC-Wandler erzeugt.

Bei der Messung wird an die Sendeelektroden nacheinander ein bipolarer symmetrischer Rechteckimpuls angelegt, während alle anderen Elektroden niederohmig mit Nullpotential verbunden sind. Der Stromeintrag auf alle Elektroden der Empfängerenebene wird durch zweistufige Strom-Spannungswandler mit programmierbarer Verstärkung gemessen. Die Impulsdauer und die Steuerung des Meßablaufes übernimmt ein anwenderspezifischer Schaltkreis (FPGA). Die programmierbare Verstärkung gestattet eine Anpassung der Auswerteelektronik an die Leitfähigkeit des zu messenden Fluids etwa zwischen 0,5 μ S/cm und 1 mS/cm.

Die Ausgangsspannung aller Vorverstärker werden durch Sample- and Holdschaltungen synchron übernommen und für die Dauer der Analog/Digital-Umsetzungen als analoger Spannungswert gespeichert. Die Analog/Digital-Umsetzungen erfolgt durch die auf den Einkartenrechnern MEGA 340 installierten vierkanaligen ADC's.

Die digitalisierten Daten werden im Einkartenrechner gepuffert und je nach gewählter Betriebsart direkt oder vorverdichtet über serielle Schnittstellen an einen PC weitergeleitet. Das Speichervolumen der Einkartenrechner beträgt 4 MB statischer RAM. Die Signalübertragung zu dem Auswerte-PC erfolgt über vier RS232 Schnittstellen mit je 115,2 kBit/s. Im Auswerte-PC erfolgt die erneute Speicherung und Visualisierung der Ergebnisse.

Vor Messungsbeginn ist zunächst eine Anpassung des Systems auf das jeweilige Meßobjekt notwendig. Dabei ist die Verstärkung des zweistufigen Vorverstärkers softwaremäßig optimal einzustellen. Jede Verstärkerstufe ermöglicht acht Verstärkungsabstufungen ($V = 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 32$ und 64).

Eine hohe Verstärkung in der ersten Vorverstärkerstufe bewirkt ein gutes Signal/Rauschverhältnis, verschlechtert aber die dynamischen Eigenschaften. Die Verstärkung der zweiten Vorverstärkerstufe sollte so gewählt werden, daß die Gesamtverstärkung beider Stufen eine gute Aussteuerung der ADCs garantiert. Sinnvoll ist es, die Verstärkungswahl bei der Eichung des Gerätes vor der Messung vorzunehmen.

Die Geräteeichung erfolgt durch die Firmware menügeführt und ist nacheinander für Wasser (ohne gasförmige Anteile) und Luft durchzuführen. (Bei der Lufteichung genügt es, wenn das vom Gittersensor kommende Empfängerkabel am Gerät abgezogen wird.)

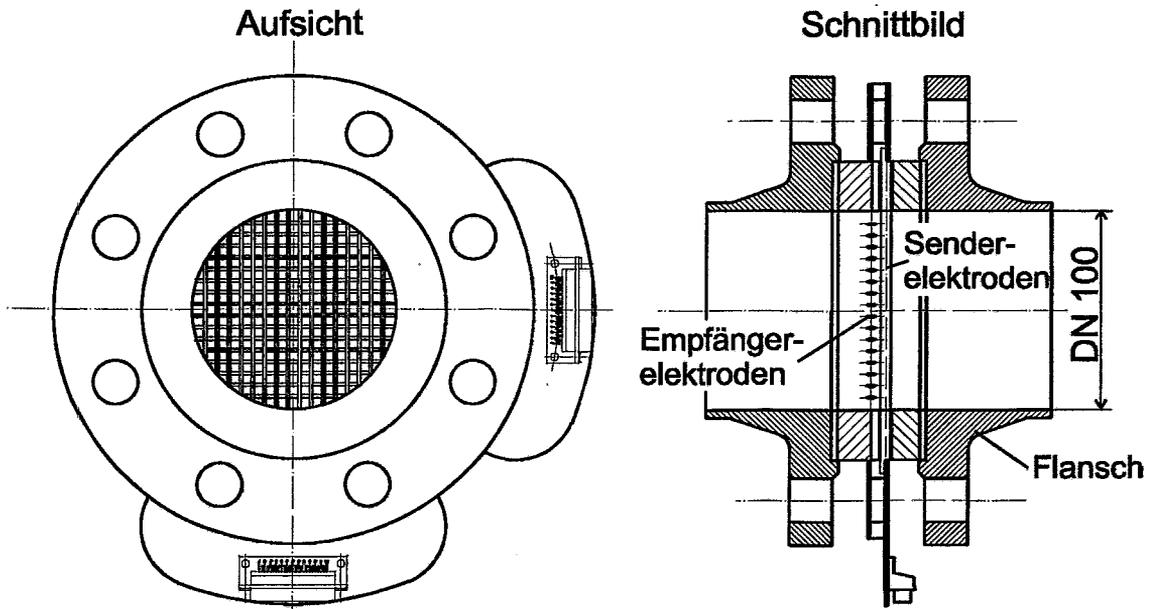


Bild 4.10 Druckfester Sensor DN100 für den industriellen Einsatz mit 2 x 16 Elektroden

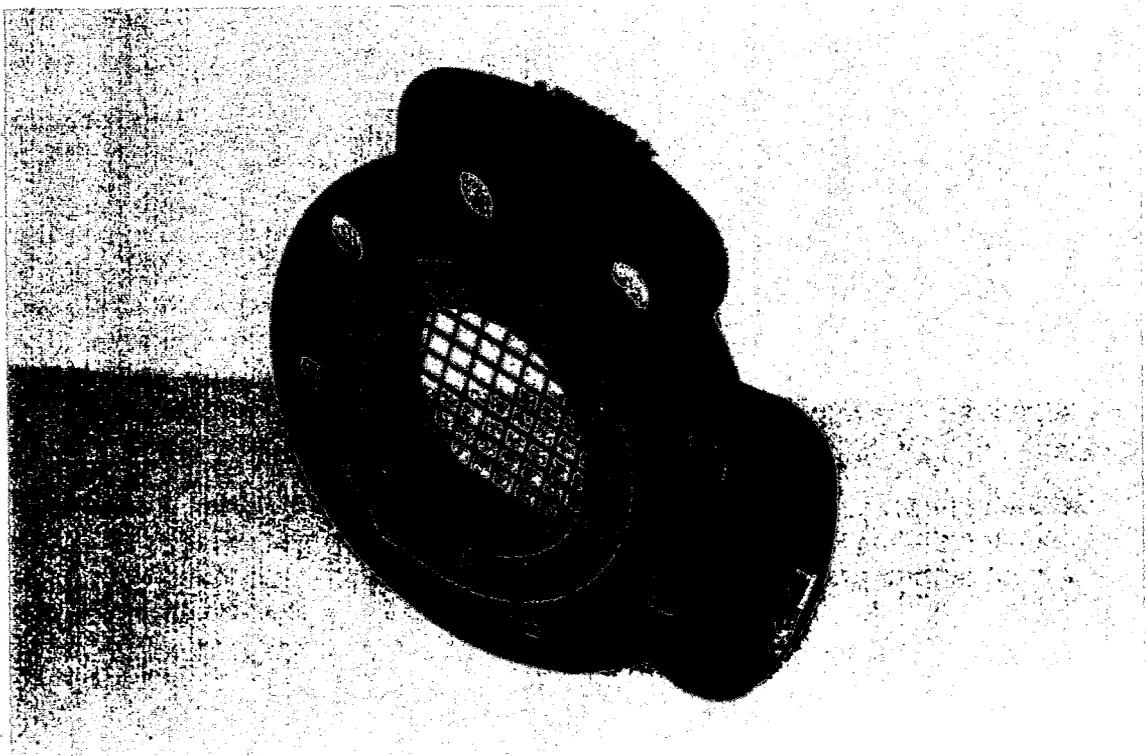


Bild 4.11 Druckfester Industriesensor DN100 mit 2 x 8 Elektroden

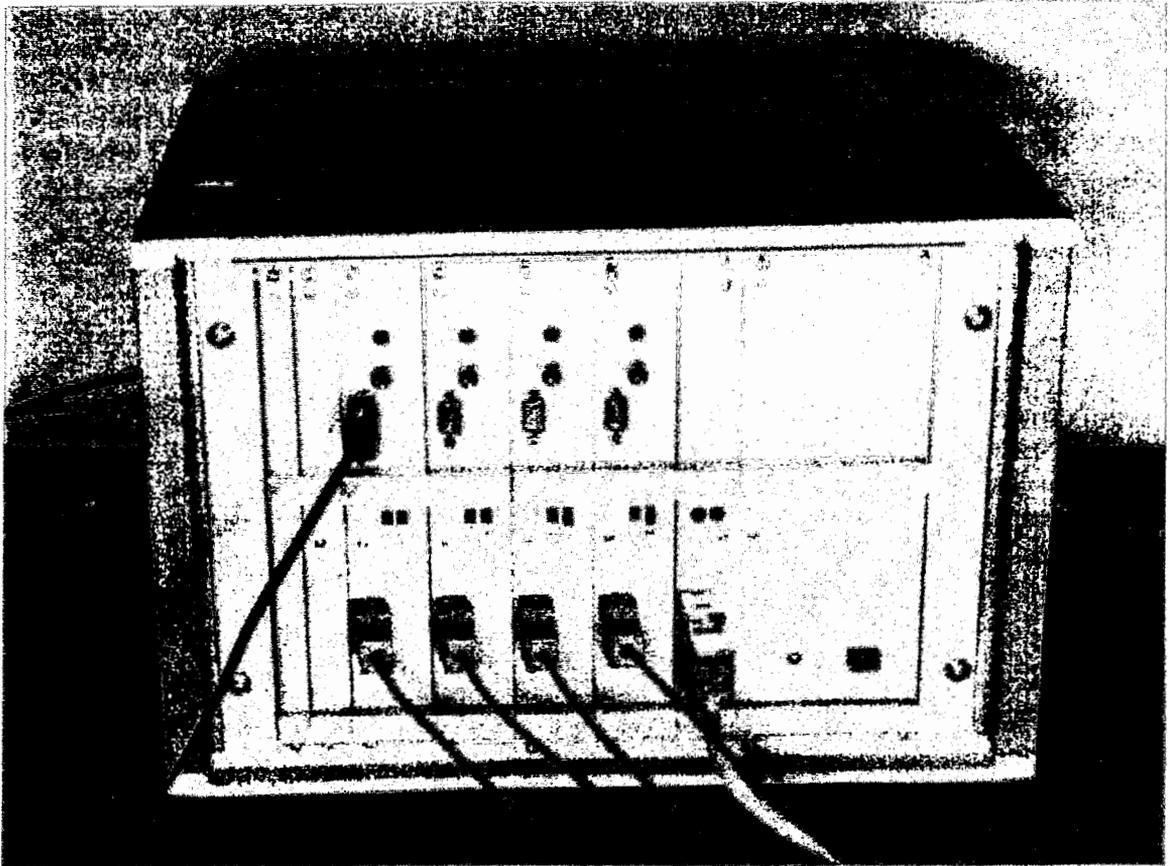


Bild 4.12 Ansteuer- und Auswerteelektronik für Gittersensoren (Prototyp)

4.1.2 Ultraschallmeßtechnik (Hardware)

In dem vom BMFT geförderten Projekt [3] wurden an der Rossendorfer Schleife umfangreiche Messungen mit dem Ziel der Erarbeitung von Mustererkennungsalgorithmen zur Beschreibung und Erkennung von Strömungsformen in Zweiphasenströmungen mittels Ultraschall durchgeführt. Dabei wurden Ultraschall-Meßsysteme verschiedener Hersteller eingesetzt. Eine vollkommene Identifikation aller Strömungsformen durch Mustererkennungsalgorithmen konnte in dem Projekt noch nicht erreicht werden. Bei der meßtechnischen Erfassung lieferte ein Ultraschall-Meßsystem der Technischen Universität Nizhni Novgorod bei diesen Experimenten an der Rossendorfer Schleife bezüglich der Bestimmung des Voidanteils die besten Ergebnisse.

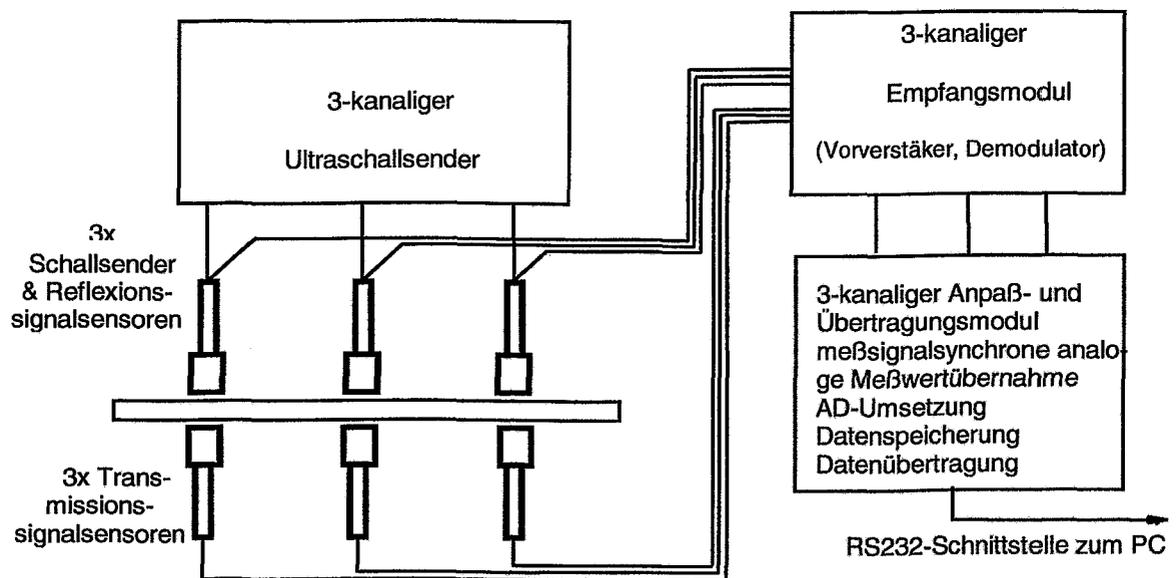


Bild 4.13 Strukturdiagramm des Ultraschall-Meßsystems

Die Ultraschallschwinger dieses Systems bieten im Vergleich zu bisherigen Systemen die Möglichkeit des Empfanges von Reflexionssignalen und ermöglichen die Kombination des Transmissions- mit dem Reflexionsregime. Da das Gerät mit relativ niederfrequentem Ultraschall arbeitet, wurde gegenüber anderen Systemen eine größere Erkennungstiefe von Gasblasen erwartet.

Das Gerät in seiner ursprünglichen Konfiguration stellt die demodulierten Reflexions- bzw. Transmissionsignale an den Ausgängen als analoge Spannungen zur Verfügung. Mit einem Zeitreferenzsignal kann das für die Messung interessierende Zeitintervall markiert werden.

Für die Experimente an der Anlage von Umsicht wurde daher ein solches Gerät in dreikanaliger Ausführung von der Technischen Universität Nizhny Novgorod erworben und im FZR so nachgerüstet, daß die Meßdaten ebenso wie bei den anderen eingesetzten Meßsystemen von einem PC erfaßt- und auswertbar sind.

Dazu wurde im FZR ein Modul entwickelt, der die analogen Meßwerte der drei Reflexions- und Transmissionskanäle synchron mit den Zeitreferenzsignalen übernimmt

und sie spannungsmäßig an den AD-Umsetzereingang anpaßt. Wie bei dem Nadelsonden- und Gittersensor-Meßsystem übernimmt ein in dem Modul eingebauter Einkartenrechner vom Typ Mega 340 der Firma MCT Berlin die Digitalisierung und Speicherung der Meßwerte. Die Übertragung zu dem Auswerte-PC erfolgt über eine RS232 Schnittstelle. Bild 4.13 zeigt das Strukturbild und Bild 4.14 das gesamte Meßsystem.

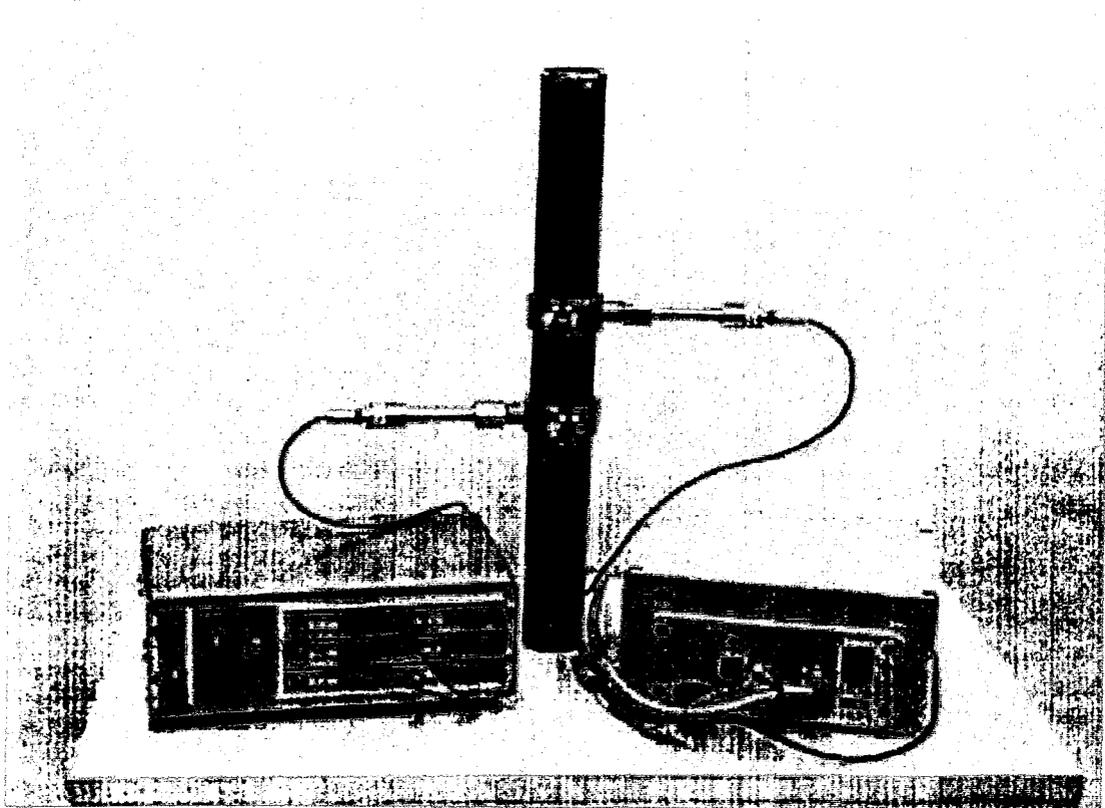


Bild 4.14 Ultraschall-Meßsystem mit Sensoren, Meßwertumformer sowie Anpass- und Übertragungsmodul

4.1.3 Firmware für die Leitfähigkeits- und Ultraschallmeßtechnik

Durch den einheitlichen Einsatz der Einkartenrechners MEGA 340 konnte die Firmware für alle drei Meßaufgaben in weiten Teilen identisch gestaltet und dadurch der Programmieraufwand in vertretbarem Rahmen gehalten werden. Die Firmware besteht aus vier Hauptkomponenten - der Kommunikationsroutinen, der Ablaufsteuerung, der ADC-Routine und der Meßwertvorverarbeitung. Die Programme wurden in C geschrieben. Der Quellcode besteht jeweils aus zwei getrennten Komponenten für die Hintergrund- und die Interrupt-Routinen, die getrennt übersetzt und anschließend gebunden werden.

Kommunikationsroutinen

Die Kommunikation wird durch Interruptroutinen realisiert, die von den Interrupts des seriellen Ein-/Ausgabebausteins USART gestartet werden. Es wurden zwei Varianten entwickelt:

1. Steuerung von Punkt-Punkt-Verbindungen zwischen je einem Modul und einer seriellen Schnittstelle am Datenerfassungs-PC,
2. Datentransfer mit mehreren Modulen an einer seriellen Schnittstelle (Bus-Betrieb).

Für letzteres werden die Ausgänge der Module hardwaremäßig zusammengeführt und an den Eingang der seriellen Schnittstelle am PC gelegt. Der Ausgang des PC wird parallel auf die Eingänge aller angeschlossenen Module gelegt. Im Übertragungsprotokoll ist seitens des PC ein Adressbyte vorgesehen, was den jeweils anzusprechenden Modul aktiviert. Alle anderen Module empfangen die Daten ebenfalls, ignorieren sie aber. Bei Punkt-Punkt-Betrieb kann das Adressbyte wegfallen. Letztlich wurden in Oberhausen aus praktischen Gründen nur Punkt-Punkt-Verbindungen realisiert. Die Module verfügen aber über die Möglichkeit des Busbetriebs.

Die Datenübertragung wird durch Kommandos vom PC aus gesteuert. Der PC ist folglich stets Master, während die angeschlossenen Module als Slaves arbeiten. Die Kommandos bestehen aus drei Byte:

- dem Adressbyte
- dem eigentlichen Kommandobyte
- einer Kontrollsumme.

Das Adressbyte ist durch ein gesetztes Bit 7 (MSB) gekennzeichnet, während in den übrigen Bytes dafür gesorgt wird, daß Bit 7 (MSB) stets Null ist. Der jeweilige Modul führt das Kommando nur aus, wenn die Adresse mit seiner eigenen Moduladresse übereinstimmt und die Kontrollsummenprüfung erfolgreich war. Als Quittierung wird die Kontrollsumme zurückgesendet. Es existieren folgende Arten von Kommandos:

- Anwahl einer bestimmten Betriebsart (u.U. mehrere verschiedene Steuerworte)
- Start der Messung
- Stop der Messung
- Aufforderung zur Datenübertragung vom Modul zum PC
- Empfangsbestätigung der Daten (wenn keine Empfangsbestätigung erhalten wird, wiederholt der Modul auf Anforderung die Sendung des Datenblocks)

Für den Busbetrieb existiert noch eine spezielle Adresse, deren Aussendung den synchronen Start aller angeschlossenen Module ermöglicht.

Bei der Datenübertragung vom Modul zum PC wird ein Block formiert, der aus 2 - 130 Byte besteht. Das erste Byte gibt die Anzahl der folgenden Datenbytes an, das letzte Byte ist eine Kontrollsumme, die durch zyklische 8-bit-Addition aus den vorher

gesendeten 129 Bytes gebildet wird. Die Anzahl der eigentlichen Datenbytes liegt folglich zwischen 0 - 128. Es werden alle 8 bit für die Datenübertragung genutzt.

Die gesamte Steuerung dieses Datentransfers erfolgt im Modul durch eine Interrupt-routine. Das bei der Messung im Hintergrund laufende Meßprogramm legt seine Daten in einem Sendepuffer ab, aus dem sie bei Anforderung entnommen werden. Die Länge des Datenblocks resultiert aus dem Fortschritt der Messung zum Zeitpunkt der Anforderung durch den PC.

Ablaufsteuerung

Die Ablaufsteuerung umfaßt die Initialisierung aller benötigten Hardwarekomponenten, die Auswertung der Steuerworte zur Betriebsartenwahl sowie den Start des Meßvorgangs. Die Messung wird in der Regel durch Freigabe des Interrupts von Timer 1 gestartet, der den AD-Vorgang auslöst.

ADC-Routine

Die ADC-Routine läuft interruptgesteuert. Sie startet den ADC und schafft anschließend die Daten je nach Betriebsart entweder in einen speziellen Signalpuffer (Sondenmodule, Meßmodus) oder direkt in den Sendepuffer.

Meßwertvorverarbeitung

Die komplexeste Meßwertvorverarbeitung wird von den Modulen für die Nadelsonden realisiert. Die Ergebnisse der AD-Wandlung werden in Paketen zu je 1 s Signalverlauf ausgewertet. Die Auswertung erfolgt im Hintergrundprogramm parallel zur Aufnahme der Daten der nächsten Sekunde. Durch diese Technik hat der Sondenmodul keine Totzeit, d.h. die Sonden-signale werden während der gesamten Meßzeit kontinuierlich mit voller Meßfrequenz von 8192 Hz abgetastet. Aus dem Meßdatenblock werden einige integrale Parameter berechnet: (1) Minimal- und Maximalwert des Signals, (2) arithmetischer Mittelwert, (3) Zeit des Kontaktes mit der Gasphase für eine Diskriminatorschwelle von 25, 50 und 75 %, gebildet aus der Differenz zwischen Maximum und Minimum und (4) Blasenfolgefrequenz, d.h. Anzahl der Gaskontakte je Sekunde. Wahlweise wird außerdem jeder einzelne Phasenübergang (Durchgang der Phasengrenze Dampf - Wasser oder Wasser - Dampf an der Sondenposition) unter genauer Zuordnung des Zeitpunkts registriert. Diese Art der Meßwertverarbeitung wurde bei den Experimenten in Oberhausen gewählt. Sie ermöglicht die vollständige Rekonstruktion des Verlaufs der Be- und Entnetzung der SONDENSPIZIE während der Versuche. Näheres ist dem Abschnitt 5 zu entnehmen.

Im Falle der Elektronikeinheit für den Gittersensor beschränkt sich der Vorverarbeitungsaufwand auf eine optionale Datenkompression. Hierbei wird das Ergebnis der AD-Wandlung mit 12 bit Datenbreite auf 8 bit komprimiert, indem es in eine Gleitkommadarstellung mit 5 bit Mantisse und 3 bit Exponent umgerechnet wird. Dabei tritt ein Informationsverlust auf. Die Genauigkeit der Darstellung beträgt im schlechtesten Fall 3 % vom darzustellenden Wert. Durch die Kompression wird bei der je Einkartenrechner zur Verfügung stehenden Speicherkapazität von 4 MB eine kontinuierliche Datenaufzeichnung über 60 s ermöglicht, während ohne Datenkompression das Maximum bei 30 s liegt. Außerdem wird die Zeit für die nach der Messung erfolgende Datenübertragung zum Auswerte-PC verringert.

Die Datenerfassung für die Ultraschallaufnehmer wird gänzlich ohne Vorverarbeitung der Meßwerte vorgenommen. Die Ergebnisse der AD-Wandlung werden direkt in den Sende-Puffer eingeschrieben. Die Abtastfrequenz wird vom Analogteil der Ultraschall-Elektronik geliefert. Sie betrug ca. 3 kHz. Die AD-Wandler werden durch ein entsprechendes externes Signal vom Analogteil gestartet. Im Einkartenrechner läuft zur Zeitmessung eine Interruptroutine, die vom Timer mit 4096 Hz gestartet wird. Den asynchron anfallenden Meßergebnissen wird der Stand eines Zählers zugeordnet, der in der Timer-Routine inkrementiert wird (Uhr). Dadurch kann später eine genaue Zuordnung des Meßzeitpunktes erfolgen.

Die Meßwerterfassungs-Software für die PC's ist in PASCAL geschrieben. Sie umfaßt die Treiber für die RS 232-Schnittstellen, die Speicherroutinen sowie eine Menüsteuerung, die es dem Bediener ermöglicht, die Meßparameter einzustellen, die Kalibrierung durchzuführen (nur im Fall des Gittersensors) und die Messung zu starten.

Bei den Betriebsarten bieten die Menüs den zeitlich nicht begrenzten on-line Betrieb mit numerischer oder grafischer Darstellung der Meßdaten auf dem Bildschirm für Kontrollmessungen oder den eigentlichen Meßbetrieb mit vorgebbarer Meßzeit, Speicherung der Meßwerte unter einem einstellbaren Filenamens, mit getriggerten oder ungetriggerten Meßbeginn an.

4.2 Die Datenübertragungsstrecke

Die im Dezember 1996 von Vertretern des UMSICHT-Instituts und des FZR festgelegte Einsatzkonzeption sah schwerpunktmäßig einen Einsatz der vom FZR bereitgestellten Meßtechnik im oberen Teil der Rohrbrücke vor. Es wurde daher für die Aufnahme der Meßwertumformer ein klimatisierter Schaltschrank konzipiert und installiert. Da die gesamte vom FZR bereitgestellte Meßtechnik für die Datenübertragung zu den Auswerterechnern auf RS232-Schnittstellen orientierte, diese aber nur ca. 15 m Kabellängen zulassen, und die Distanz von der Rohrbrücke bis zur Warte, dem Standort der Auswerte-PCs, etwa 80-100 m beträgt, mußte für die Datenübertragung eine besondere Übertragungsstrecke installiert werden.

Als Übertragungsmedien wurden Lichtwellenleiter eingesetzt und im Schaltschrank und der Warte jeweils ein 19" Volleinschub für die Anpassung der RS232-Schnittstellen an das optische Übertragungsmedium installiert. Bei diesem modular aufgebauten opto-elektrischen Wandler (Bild 4.15) realisiert jedes Modul die opto-elektrische Anpassung für zwei Duplexkanäle. Die gegenwärtige Ausbaustufe verfügt über 12 Duplexkanäle.

In dem 19" Volleinschub in der Warte ist noch eine Elektronik zur Synchronisation der einzelnen Meßsysteme integriert. Dazu wird in einem speziellen Modul ein von einem anlagenspezifischen Signal (im gegebenen Fall vom Betätigen der Schnellschlußklappe) abgeleiteter Spannungsimpuls so pegeltransformiert, daß vier Meßsysteme synchronisiert gestartet werden können.

Als Triggereingang in den Meßsystemen wird eine für die Datenübertragung nicht benutzte COM-Schnittstelle genutzt.

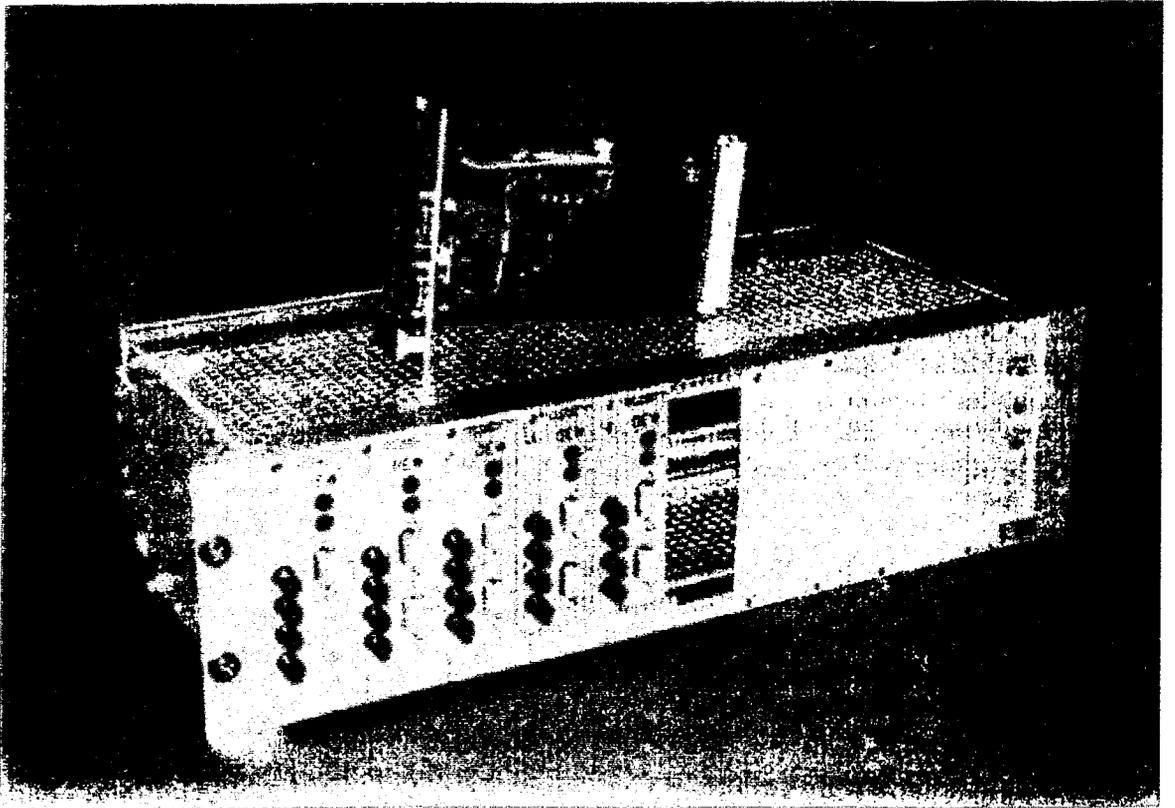


Bild 4.15 Opto-elektrische Wandlereinheit

5 Meßwertverarbeitung und Kalibrierung

5.1 Auswertesoftware

5.1.1 Verarbeitung der Gittersensor-Signale

Die Primärdaten einer Messung des Gittersensors bestehen aus Arrays von 16 x 16 Spannungswerten $U_{i,j}$, die als Ergebnisse der AD-Wandlung ganzzahlige Werte zwischen 0 und 4095 darstellen. Die Referenzspannung beträgt 4.096 V, so daß die Werte direkt als Spannungen mit der Maßeinheit mV vorliegen. Jeder einzelne Wert ist einem Kreuzungspunkt zweier Elektroden zugeordnet. Im weiteren bezeichnet der erste Index die Nummer der Sendeelektrode und der zweite die Nummer der Empfängerelektrode, die den jeweiligen Kreuzungspunkt bilden.

Bei Vorliegen eines Mediums mit der Leitfähigkeit $\sigma_{i,j}$ ergibt sich gegenüber der Leitfähigkeit 0 ein Spannungshub $\Delta U_{i,j}$ aus der Anregungsspannung an der Sendeelektrode $U_{S,i}$, einer Sondenkonstante $k_{i,j}$, die im allgemeinen für jeden Kreuzungspunkt geometriebedingt einen individuellen Wert annehmen kann, sowie aus der Verstärkung der empfängerseitigen Eingangsstufen V_E :

$$\Delta U_{i,j} = V_E \cdot \frac{\sigma_{i,j}}{k_{i,j}} \cdot U_{S,i} \quad (5.1)$$

Bei der Umrechnung des Spannungshubs $\Delta U_{i,j}$ in lokale volumetrische Gasanteile wurde von einer Proportionalität zwischen dem Flüssigkeitsanteil $1-\varepsilon_{i,j}$ und der örtlichen Leitfähigkeit $\sigma_{i,j}$ ausgegangen, wobei das Gas als ideal isolierend betrachtet wird:

$$\varepsilon_{i,j} = 1 - \frac{\sigma_{i,j}}{\sigma_w} \quad (5.2)$$

Diese Annahme wurde getroffen, weil die Gültigkeit der gängigen nichtlinearen Beziehungen für die Leitfähigkeit einer feindispersen Blasenströmung für das relativ kleine Kontrollvolumen, das am Kreuzungspunkt der Elektroden vorliegt, bezweifelt werden muß. Bei den Druckstoßexperimenten mit Wasser war zu erwarten, daß die Blasengröße in den meisten Fällen vergleichbar oder größer als die Abmessung dieses Kontrollvolumens ist. Damit liegt eher der Fall vor, daß eine Phasengrenzfläche durch das Kontrollvolumen verläuft, als daß sich ein feindisperses Blasenmedium darin befindet. Die Abhängigkeit des Zusammenhangs zwischen Leitwert und Gasgehalt ist dann stark von der Geometrie dieser Phasengrenzfläche abhängig, über die im Einzelfall keine ausreichende Information vorliegt. Aus diesem Grund wurde der Weg begangen, die Annahme eines proportionalen Zusammenhangs zu treffen und die so ermittelten volumetrischen Gasanteile anhand von Vergleichsmessungen mit einem Gamma-Densitometer an der Zweiphasentestschleife des Instituts für Sicherheitsforschung zu überprüfen (Abschnitt 5.2.3).

Für die Annahme von idealen senderseitigen Ausgangsstufen mit unendlich kleinem Ausgangswiderstand ist $U_{S,i} = \text{const.}$ Unter dieser Annahme gilt dann auch Propor-

tionalität zwischen $\Delta U_{i,j}$ und $\varepsilon_{i,j}$. Es genügt folglich, wenn eine Kalibrierung von Sensor und Signalerfassungseinheit durchgeführt wird, indem die Spannungswerte für die zwei Zustände „Rohrleitung mit Wasser gefüllt“ ($U_{W,i,j}$) und „Rohrleitung mit Luft gefüllt“ ($U_{L,i,j}$) ermittelt und als Bezugsmatrizen abgespeichert werden. Die Umrechnung in lokale volumetrische Gasanteile geschieht dann nach folgender Beziehung:

$$\varepsilon_{i,j} = 1 - \frac{\Delta U_{i,j}}{\Delta U_{W,i,j}} \quad \text{wobei gilt} \quad \Delta U_{i,j} = U_{i,j} - U_{L,i,j} \quad \Delta U_{W,i,j} = U_{W,i,j} - U_{L,i,j} \quad (5.3)$$

$U_{L,i,j}$ spielt hierbei die Rolle einer Nullpunktkorrektur, durch die spezielle Hardwaremaßnahmen zur Stabilisierung der Nullpunkte der Verstärker entfallen konnten.

In der Praxis hat sich herausgestellt, daß die Leitfähigkeit des eingesetzten Wassers so groß war, daß die Konstanz der Erregungsspannung der Senderelektroden nicht voll gegeben war. Der von den Sendeelektroden gegen Masse abfließende Strom führte zu einem nicht mehr zu vernachlässigenden Spannungsabfall an den ausgangsseitig vorgesehenen Schutzwiderständen der Ausgangsstufen R_A :

$$U_{S,i} = U_{S0} - I_{S,i} \cdot R_A \quad (5.4)$$

Die größten Ströme fließen dabei genau dann, wenn die Rohrleitung vollständig mit Wasser gefüllt ist, d.h. zum Zeitpunkt der Kalibrierung auf Wasser. Beim Vorliegen von mehr oder weniger viel Dampf sind die Ströme geringer. Das hat zur Folge, daß die Erregerspannung ansteigt. Das muß in Gl. (5.3) berücksichtigt werden, die bei veränderlicher Erregerspannung die folgende Form annimmt:

$$\varepsilon_{i,j} = 1 - \frac{\Delta U_{i,j}}{\Delta U_{W,i,j}} \cdot \frac{U_{SW,i}}{U_{S,i}} = 1 - \frac{\Delta U_{i,j}}{\Delta U_{W,i,j}} \cdot \frac{U_{S0} - I_{SW,i} \cdot R_A}{U_{S0} - I_{S,i} \cdot R_A} \quad (5.5)$$

Hierbei bezeichnet der Index SW die Spannung bzw. den Strom an der entsprechenden Senderelektrode während der Kalibrierung mit Wasser und der Index S bei der eigentlichen Messung. Es besteht die Schwierigkeit, die Ströme $I_{SW,i}$ und $I_{S,i}$ genau zu bestimmen. Man kann jedoch davon ausgehen, daß der Senderstrom annähernd proportional der Summe der Ströme ist, die an den Empfängerelektroden während der Aktivierung der entsprechenden Senderelektrode auftreten:

$$I_{S,i} = c \cdot \sum_{j=1}^{n_E} I_{E,i,j} = \frac{c}{V_E} \cdot \sum_{j=1}^{n_E} U_{i,j} \quad \text{bzw.} \quad I_{SW,i} = \frac{c}{V_E} \cdot \sum_{j=1}^{n_E} U_{W,i,j} \quad (5.6)$$

Eingesetzt in Gl. (5.5) erhält man

$$\varepsilon_{i,j} = 1 - \frac{\Delta U_{i,j}}{\Delta U_{W,i,j}} \cdot \frac{1 - \frac{c \cdot R_A}{V_E \cdot U_{S0}} \cdot \sum_{j=1}^{n_E} U_{W,i,j}}{1 - \frac{c \cdot R_A}{V_E \cdot U_{S0}} \cdot \sum_{j=1}^{n_E} U_{i,j}} = 1 - \frac{\Delta U_{i,j}}{\Delta U_{W,corr,i,j}} \quad (5.7)$$

wobei der rechte Faktor korrigierten Kalibrierwerten zugeschlagen wurde:

$$\Delta U_{W,corr,i,j} = \Delta U_{W,i,j} \cdot \frac{1 - \frac{c \cdot R_A}{V_E \cdot U_{S0}} \cdot \sum_{j=1}^{n_E} U_{i,j}}{1 - \frac{c \cdot R_A}{V_E \cdot U_{S0}} \cdot \sum_{j=1}^{n_E} U_{W,i,j}} \quad (5.8)$$

Der Koeffizient $K_{corr} = \frac{c \cdot R_A}{V_E \cdot U_{S0}}$ wurde empirisch durch Anpassung an Zeitverläufe von $U_{i,j}$ ermittelt (Bild 5.1). Dazu können Signalverläufe verwendet werden, die bei Vorliegen einer Schichtströmung aufgezeichnet wurden. In Bild 5.1 ist das während der 2. Kavitationsblase von ca. $t=5$ s an der Fall (vgl. Abschnitt 6).

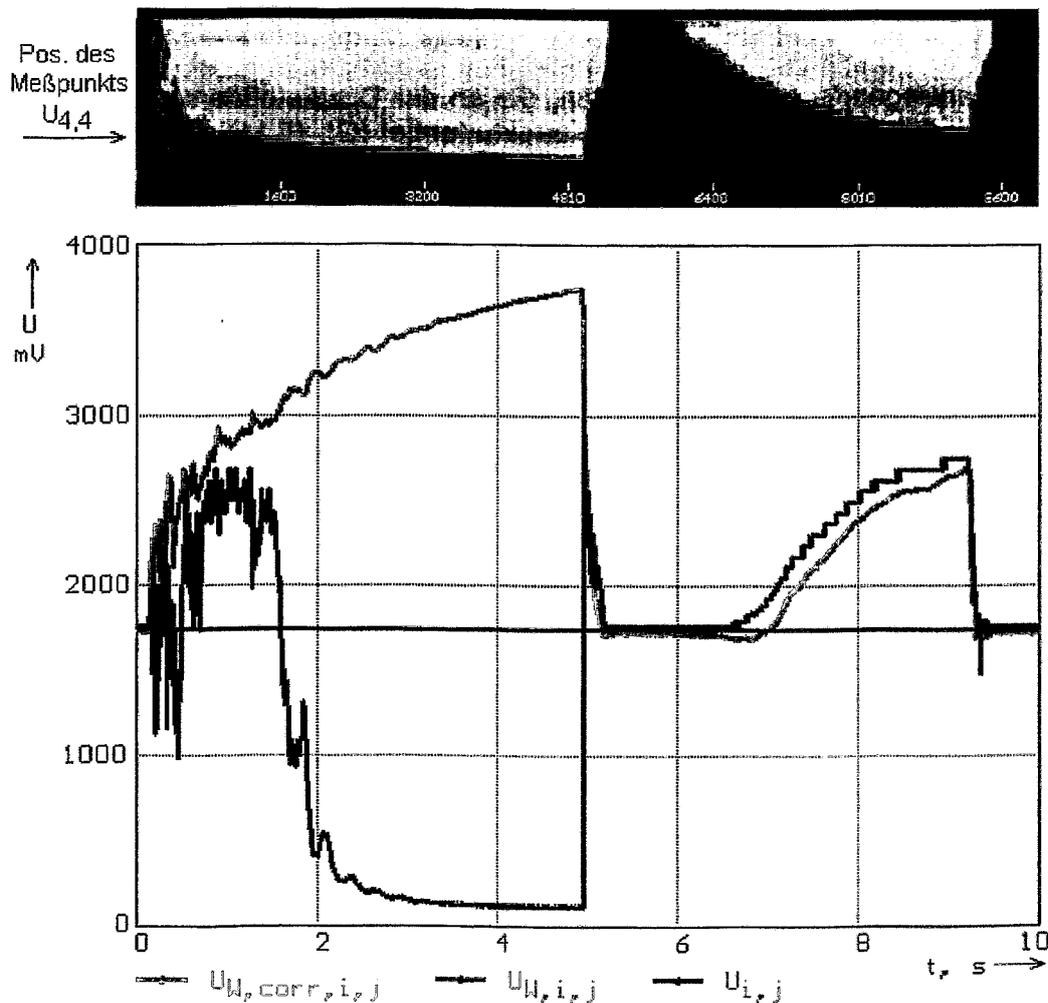


Bild 5.1 Rohsignale des Gittersensors am Meßpunkt $i=4$, $j=4$ bei Kavitation hinter der schnellschließenden Klappe

$U_{i,j}$ - Meßsignal, $U_{W,i,j}$ - Kalibrierwert bei Wasser, $U_{W,corr,i,j}$ - korrigierter Kalibrierwert nach Gl. (5.9) mit $K_{corr} = 0.05 \text{ V}^{-1}$

Wenn die Schichthöhe abnimmt, werden in senkrechter Richtung immer mehr Meßpunkte freigelegt. Der Senderstrom nimmt kontinuierlich ab, wodurch die Senderspannung zunimmt. Diejenigen Meßpunkte, die sich im unteren Teil des Rohrleitungsquerschnitts befinden, registrieren dadurch eine Zunahme des Spannungshubs $\Delta U_{i,j}$, die über den Kalibrierwert $\Delta U_{W,i,j}$ hinaus anwächst, obwohl dort nach wie vor Wasser vorliegt. Durch die Wahl von $K_{\text{corr}} = 0.022 \text{ V}^{-1}$ folgt der korrigierte Kalibrierwert $U_{W,\text{corr},i,j}$ wieder annähernd dem Meßwert. Wenn die Gasphase am Meßpunkt auftritt, dann fällt $\Delta U_{i,j}$ auf 0 ab. $\Delta U_{W,\text{corr},i,j}$ verhält sich dann wie eine Einhüllende zu dem Signalverlauf (Bild 5.1).

Der Wert für den Korrekturkoeffizienten ist von der eingestellten Verstärkung abhängig. $K_{\text{corr}} = 0.022 \text{ V}^{-1}$ wurde für die Verstärkungsstufen 1 in Vor- und Nachverstärker ermittelt. Bei Erhöhung der Verstärkung um je eine Stufe (Faktor 2) muß K_{corr} in entgegengesetzter Weise, also um den Faktor 2, verringert werden (und umgekehrt).

Für die überwiegende Anzahl Meßdaten, die an der Druckstoßversuchsanlage erhalten wurden, kam eine modifizierte Korrekturformel (Gl. (5.11)) zur Anwendung. Die Beziehung erhält man durch weiteres Umstellen von Gl. (5.8):

$$\Delta U_{W,\text{corr},i,j} = \Delta U_{W,i,j} \cdot \left(1 + \frac{\frac{c \cdot R_A}{V_E \cdot U_{S0}} \cdot \left(\sum_{j=1}^{n_E} U_{W,i,j} - \sum_{j=1}^{n_E} U_{i,j} \right)}{1 - \frac{c \cdot R_A}{V_E \cdot U_{S0}} \cdot \sum_{j=1}^{n_E} U_{W,i,j}} \right) \quad (5.9)$$

Da $\sum U_{W,i,j}$ bei konstanter Leitfähigkeit des Strömungsmediums unverändert bleibt, kann der Korrekturkoeffizient auch wie folgt definiert werden:

$$K_{\text{corr}}^* = \frac{\frac{c \cdot R_A}{V_E \cdot U_{S0}} \cdot \sum_{j=1}^{n_E} U_{W,i,j}}{1 - \frac{c \cdot R_A}{V_E \cdot U_{S0}} \cdot \sum_{j=1}^{n_E} U_{W,i,j}} \quad (5.10)$$

Im Ergebnis erhält man die Korrekturformel

$$\Delta U_{W,\text{corr},i,j} = \Delta U_{W,i,j} \cdot \left(1 + K_{\text{corr}}^* \cdot \frac{\left(\sum_{j=1}^{n_E} U_{W,i,j} - \sum_{j=1}^{n_E} U_{i,j} \right)}{\sum_{j=1}^{n_E} U_{W,i,j}} \right) \quad (5.11)$$

Der modifizierte Korrekturkoeffizient wurde empirisch zu $K_{\text{corr}}^* = 0.8$ ermittelt. Die in Dampfgehalte umgerechneten Meßergebnisse liegen in Form von Datenfeldern vor, bei denen die lokalen Dampf- bzw. Gasgehalte in Schritten zu 1 % als ganze Zahl aus dem Wertebereich [0,100] dargestellt sind. Zu jedem Meßzeitpunkt gehört ein Feld von 16 x 16 ganzzahligen Werten. Für jede Sekunde Echtzeit wurden 1024

solcher Felder abgelegt. Das entsprechende Datenfile hat den Typ (in PASCAL-Notation)

```
type
  datentyp=array[1..ne,1..ne] of byte;
var
  datenfile:file of datentyp;
  eps:datentyp;
```

Hierbei ist ne die Anzahl der Sender- bzw. Empfängerelektroden des jeweiligen Sensors. Beim gleichzeitigen Einsatz von zwei Sensoren sind die einzelnen Felder jeweils abwechselnd nacheinander abgespeichert. Ein Einlesebefehl, der die Daten zweier Gittersensoren für einen Meßzeitpunkt einlesen soll, muß folglich lauten:

```
read(datenfile,eps1,eps2);
```

vorausgesetzt, die beiden Felder $eps1$ und $eps2$ haben den Typ $datentyp$.

Aus den zweidimensionalen Gas- bzw. Dampfgehaltsverteilungen wurden für die spätere Gegenüberstellung mit anderen Parametern Verläufe des Mittelwerts über dem Strömungsquerschnitt berechnet. Hierfür werden die einzelnen lokalen Gasanteile summiert, wobei eine Gewichtsfunktion a_{ij} angewandt wird, die dem Anteil der einem Meßpunkt zuzuordnenden Querschnittsfläche am Gesamtquerschnitt der Rohrleitung entspricht. Bei all den Meßpunkten, die nicht am Rand liegen, ist der Wert der Gewichtskoeffizienten gleich dem Produkt der Schrittweite der Elektroden in x - und y -Richtung, dividiert durch den Rohrleitungsquerschnitt:

$$a_{ij} = \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{\frac{\pi}{4} D^2} \quad (5.12)$$

Für Punkte, die an der Wand liegen, sind die Koeffizienten kleiner, als der Wert nach Gl. (5.12). Die Randlektroden entfernen sich konstruktionsbedingt im mittleren Bereich weiter von der Wand, als $\Delta x/2$ bzw. $\Delta y/2$. Für diese Meßpunkte werden die Koeffizienten gegenüber Gl. (5.12) entsprechend vergrößert, d.h. der Meßwert wird auf die von den Elektroden weiter entfernten Bereiche extrapoliert. Bei der Berechnung dieser Flächenanteile wurde die zu erwartende horizontale Orientierung der Dampfgehaltsverteilungen infolge der Separationseffekte berücksichtigt, um den Mittelungsfehler so klein wie möglich zu halten. Der mittlere Dampf- bzw. Gasgehalt ergibt sich nach folgender Gleichung:

$$\bar{\epsilon} = \sum_{\forall x,y} a_{x,y} \cdot \epsilon_{x,y} \quad (5.13)$$

Für den Vergleich mit den Gasgehalten des Gamma-Durchstrahlungsmeßgeräts, mußten außerdem lineare Mittelwerte entlang des Rohrleitungsdurchmessers berechnet werden. Diese Mittelung kann ebenfalls mit Hilfe der Koeffizienten a_{ij} geschehen, wobei jedoch berücksichtigt werden muß, daß sich das Gewicht des einzelnen lokalen Dampfgehaltswerts mit wachsendem Radius verringert:

$$\bar{\varepsilon}_{ED} = \frac{\sum_{\forall x,y} a_{x,y} \cdot \varepsilon_{x,y} / r_{x,y}}{\sum_{\forall x,y} a_{x,y} / r_{x,y}} \quad \text{wobei gilt} \quad r_{x,y} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5.14)$$

5.1.2 Verarbeitung der Nadelsondensignale

Die Auswertung der Sondersignale beginnt mit der Vorverarbeitung und Vorverdichtung in den Signalerfassungsmodulen. Die Ergebnisse der AD-Wandlung des analogen Sondersignals werden zunächst mit einer Abtastrate von 8192 Hz abgespeichert. Wie beim Gittersensor handelt es sich um ganzzahlige Werte zwischen 0 und 4095 mV, die entsprechend der Kennlinie der Vorverstärker proportional zum Logarithmus des momentanen Sondenstroms sind.

Die Vorverarbeitung beginnt jeweils, nachdem ein Datenblock von je 8192 Werten für alle 4 an den Modul angeschlossene Sonden gefüllt ist. Dies entspricht einer Meßzeit von 1 s. Die Auswertung beginnt mit der Berechnung von Minimal-, Maximal- und Mittelwert des Signals über den Zeitraum von 1 s. Zur Unterdrückung von Störspitzen ist der Berechnung der Extremwerte eine exponentielle Glättung mit einer Zeitkonstante von 1 ms vorgeschaltet. Da beim Auftreten von Phasenwechseln an der Sondenspitze das Signal zwischen den für Wasser und den für Dampf bzw. Gas typischen Wert wechselt, erhält man diese Bezugswerte durch die Extremwertbildung. Aus Maximum und Minimum werden anschließend drei Schwellwerte berechnet, die die Spannungsniveaus für 25, 50 und 75 % des für die leitfähige Phase charakteristischen Sondenstroms widerspiegeln. Mit Hilfe dieser Schwellwerte erfolgt in einem zweiten Durchlauf durch das Datenmassiv die Identifikation von Phasenwechseln und die Berechnung von zeitlich gemittelten, lokalen Gasanteilen. Für die Experimente an der Druckstoß-Versuchsanlage wurde nur die Identifikation von Phasenübergängen benutzt.

Für den Übergang von Flüssigkeit auf Dampf bzw. Gas wird als Kriterium die Unterschreitung von 50 % des Maximalwerts durch den momentanen Sondenstrom angewandt. Aus Gründen der Unterdrückung von Störspannungen wird für den Phasenübergang Gas - Flüssigkeit die Überschreitung des 75 %-Schwellwerts gefordert. Dadurch entsteht eine Hysterese von 25 % der Signalamplitude. Jeder detektierte Phasenwechsel wird durch einen Eintrag in einen Ergebnispufer registriert. Die abgespeicherte Information umfaßt die Nummer des Kanals (0-3), die Art des Phasenwechsels (0: Gas - Flüssigkeit, 1: Flüssigkeit - Gas) und einen Zählerstand, der den Zeitpunkt des Phasenwechsels mit der maximal möglichen Auflösung von 1/8192 s wiedergibt.

Die Sondenmodule übermitteln die genannten Ergebnisse der Vorverarbeitung an den Datenerfassungs-PC, wo sie zunächst auf Festplatte gespeichert werden. Für die weitere Auswertung werden die Phasenwechsel-Einträge aus den Meßdatenfiles extrahiert und derart abgespeichert, daß für jede Sonde ein Datensatz entsteht, der nur die Zeitpunkte von Phasenwechseln mit einer Genauigkeit von 1/8192 s enthält, wobei jedem eingetragenen Zeitpunkt noch der Phasenzustand (0 für Wasser, 1 für Gas bzw. Dampf) zugeordnet ist, der ab dem jeweiligen Moment an der Sondenspitze vorgelegen hat.

Für den Vergleich mit Drucksignalen und den Meßwerten, die die Gittersensoren liefern, hat es sich als zweckmäßig erwiesen, aus diesen Daten Verläufe des zeitlich gemittelten lokalen Gasanteils mit gleichmäßiger Zeitschritteinteilung zu berechnen. Dabei wurde jeweils über 64 Abtastungen gemittelt, so daß die Gasgehaltsverläufe eine Zeitauflösung von ca. 16 ms besitzen. Dadurch ist es möglich, die Bewegungen der Kavitationsblasen in der Rohrleitung mit ausreichender Auflösung zu beobachten, wie im Kapitel 6 gezeigt wird.

5.1.3 Verarbeitung der Ultraschallsignale

Die Ultraschallaufnehmer-Paare liefern gleichzeitig zwei Signale: Die Intensität des durch die Rohrleitung durchtretenden Schallsignals und die Intensität des reflektierten Anteils. Beide Signale liegen als Zeitreihen ganzzahliger Spannungswerte von 0 - 4095 mV vor. Die Abtastfrequenz beträgt bei der Messung ca. 2.7 - 3 kHz. In der Regel wurden die Signale in ihrer Rohform graphisch dargestellt oder auf die Referenzpegel bei wasser- bzw. gasgefüllter Rohrleitung bezogen.

5.2 Kalibrierung an der Zweiphasen-Testschleife

5.2.1 Testschleife und Versuchsregime

Die Nadelsonden, Gittersensoren und Ultraschallaufnehmer wurden an der vertikalen Testsektion der Zweiphasentestschleife des Instituts für Sicherheitsforschung kalibriert (Bild 5.2). Die Anlage wurde mit einem Wasser-Luft-Gemisch bei 30 °C und Atmosphärendruck betrieben. Die Rohrleitung hat einen Innendurchmesser von 51.2 mm (NW50), aus diesem Grund wurden nur Gittersensoren der NW50 untersucht.

Mit Hilfe einer drehzahlregelten Pumpe und einer Regelarmatur wird ein Wasserstrom mit einer Leerrohrgeschwindigkeit zwischen 0 und 4 m/s erzeugt. Über eine Einpervorrichtung wird etwa 70 L/D vor der Meßposition Luft eingespeist. Die Luft gelangt über eine Reihe von Kanülen in die Rohrleitung, deren Enden im Rohrleitungsquerschnitt gleichmäßig verteilt angeordnet sind. Der Luftdurchsatz wird mit Hilfe von vier Durchflußreglern mit Hitzdraht-Meßstelle eingestellt, die unterschiedliche Meßbereiche überstreichen: (1) 0 - 5 l/min, (2) 5 - 50 l/min, (3) 50 - 200 l/min und (4) 200 - 1500 l/min.

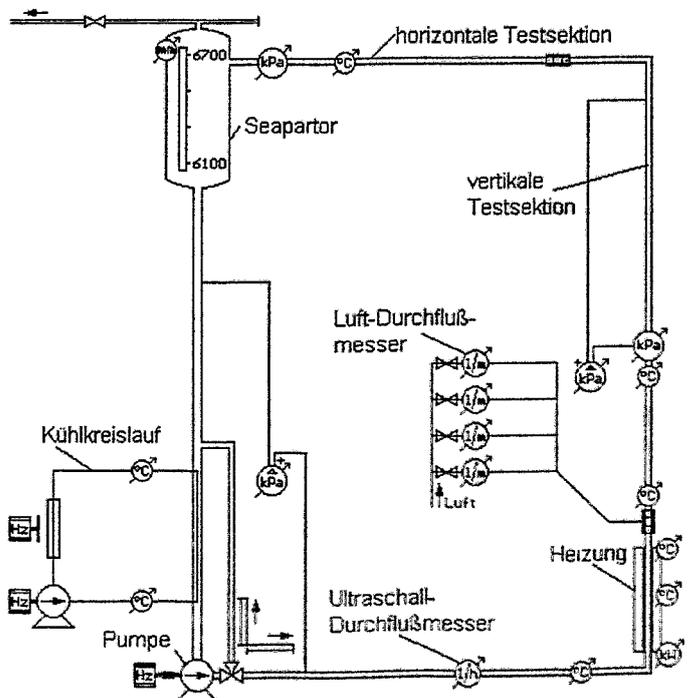


Bild 5.2 Zweiphasentestschleife mit Instrumentierung

Dadurch wird sichergestellt, daß im Bereich von 0.002 - 12 m/s die Gasvolumenstromdichte mit einem Fehler von maximal 10 % vom jeweiligen Meßwert reproduziert werden kann. Die Fehlerkurven sind in Bild 5.3 dargestellt. Die Temperatur wurde durch Heizen und Kühlen mit einem Fehler von maximal ± 1 K konstant gehalten.

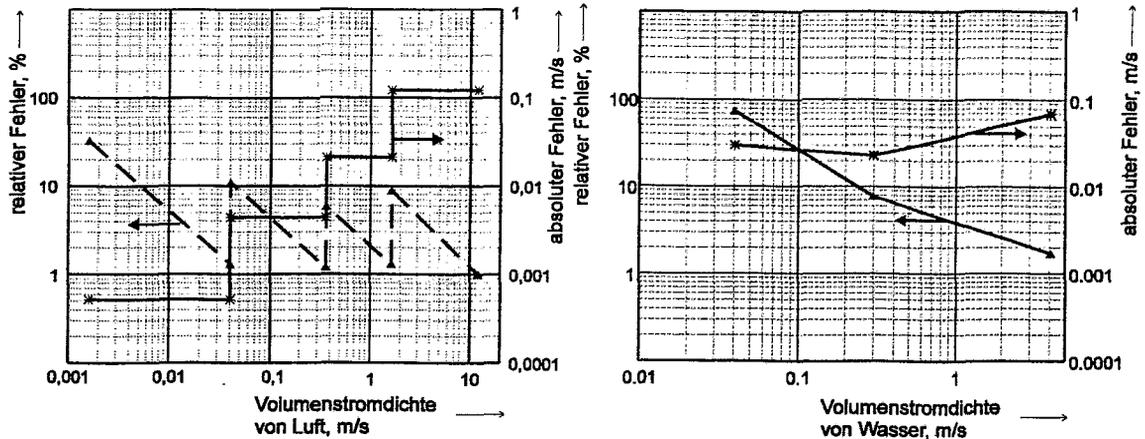


Bild 5.3 Genauigkeit der Volumenstrommessung für Luft und Wasser

Für die Kalibrierexperimente wurde eine Versuchsmatrix definiert, die insgesamt 220 Paare von Volumenstromdichten beinhaltet (Bild 6.4). Für alle Punkte wurden Ultraschalltransmissions- und -reflexionssignale sowie die Signale der Leitfähigkeitssonden aufgezeichnet. Mit einem Drahtgittersensor mit 0.12 mm Drahtdurchmesser und 16 x 16 Meßpunkten (Gitterschrittweite 3 mm) wurde ebenfalls die gesamte Matrix abgefahren. Eine Referenzmessung mit einer Gamma-Durchstrahlungseinrichtung wurde bei 146 von 220 Matrixpunkten realisiert, die in Bild 6.4 durch schwarz ausgefüllte Quadrate gekennzeichnet sind.

Die Volumenstromdichten in Bild 5.4 stellen Sollwerte für Normalbedingungen (20 °C, 1 bar) dar. Durch den Druckverlust in der Rohrleitung der Versuchsschleife findet mit wachsender Geschwindigkeit ein zunehmender Druckaufbau statt, der dazu führt, daß die tatsächlichen Volumenstromdichten der kompressiblen Phase (Luft) entsprechend der Zustandsgleichung für ideale Gase korrigiert werden müssen. Dazu kommt, daß zwischen Soll- und Istwert eine Abweichung auftritt, die sich insbesondere bei sehr kleinen Gasvolumenströmen spürbar äußert. In Bild 5.5 sind die tatsächlichen Vo-

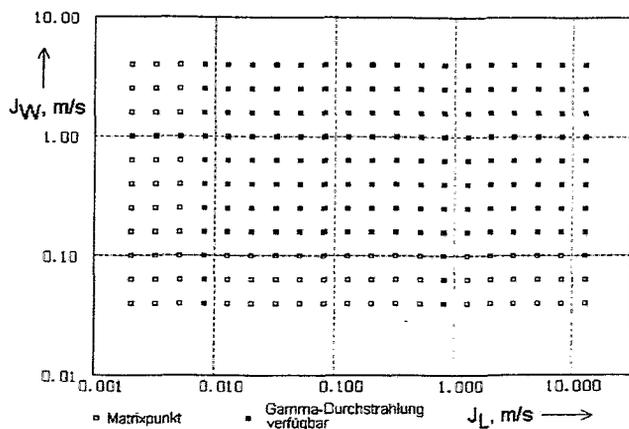


Bild 5.4 Versuchsmatrix, Volumenstromdichten bezogen auf Normalbedingungen

lumenstromdichten am Meßort dargestellt. Besonders bei den höheren Volumenstromdichten des Wassers führt der Druckaufbau zu einer Kompression der Luft und damit zu einer Abnahme der Volumenstromdichte, die eine Verschiebung der Matrixpunkte nach links bewirkt.

Zur Untersuchung der Meßgenauigkeit der Gittersensoren, die bei den Druckstoßexperimenten zum Einsatz kamen, wurden zwei Sensoren mit verstärkten Elektrodenstäbchen unmittelbar übereinander in die vertikale Testsektion eingebaut (Bild 5.6). Es handelt sich um zwei Sensoren NW50 mit 8 x 8 Meßpunkten. Die mit diesen Sensoren realisierten Kalibrierpunkte sind in Bild 5.5 schwarz ausgefüllt dargestellt.

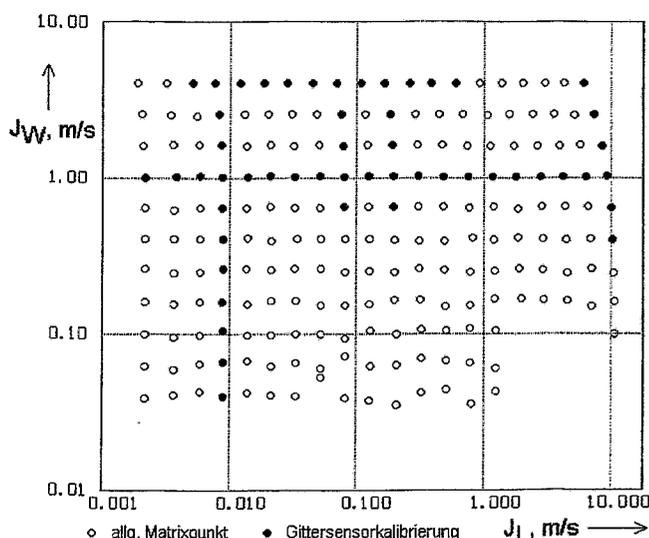


Bild 5.5 Tatsächliche Volumenstromdichten am Meßort unter Berücksichtigung der Kompressibilität der Gasphase

Bei der Gamma-Durchstrahlungseinrichtung handelt es sich um ein Einstrahl-Gamma-Densitometer mit 5 mm Strahldurchmesser, Wolfram-Kollimatoren und einem NaJ-Szintillationsdetektor mit Sekundärelektronenvervielfacher. Bei der Quelle handelte es sich um Cs-137 mit einer Aktivität von 13 mCi. Wegen der niedrigen Aktivität mußte mit einer Meßzeit von 120 s gearbeitet werden, um sicherzustellen, daß der statistische Meßfehler unter 1 % bleibt. Aus diesem Grund konnten die übrigen Meßverfahren nur anhand von zeitlichen Mittelwerten mit den Ergebnissen der Gamma-Durchstrahlung verglichen werden. Der Strahl des Gamma-Densitometers wurde so ausgerichtet, daß der lineare Mittelwert der Dichte bzw. des Gasgehalts entlang des Durchmessers der Rohrleitung ermittelt wurde. Deshalb mußten die Gasgehaltsverteilungen, die die Nadelsonden und die Gittersensoren lieferten, ebenfalls linear über den Durchmesser gemittelt werden (vgl. Gl. 5.14).

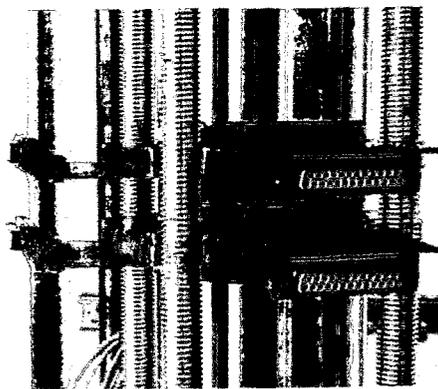


Bild 5.6 Gittersensoren an der Zweiphasen-Testschleife

5.2.2 Ermittlung der Meßgenauigkeit der Nadelsonden

Bei den Nadelsonden handelte es sich um 8 Einpunktsonden mit einem Durchmesser der Sondenspitze von 0.5 mm. Die Einbautiefe der Sonden war gestaffelt.

Die erste Sonde befand sich 2 mm von der inneren Wandung entfernt, die letzte Sonde war genau im Zentrum der Rohrleitung angeordnet. Aus den so ermittelten Gasgehaltsprofilen konnte der lineare Mittelwert für den Vergleich mit dem Gamma-Desitometer unter Berücksichtigung der genauen radialen Positionen ermittelt werden.

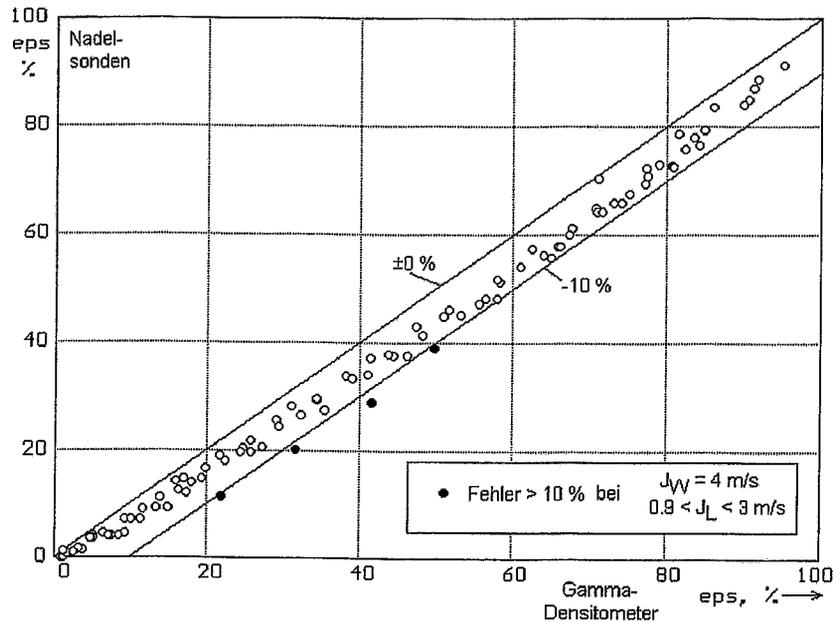


Bild 5.7 Gegenüberstellung Nadelsonden - Gamma-Desitometer, lineare Mittelwerte des Gasanteils

Die Gegenüberstellung der Nadelsonden - Gamma-Desitometer erfolgt in Bild 5.7. Insgesamt liefern die Nadelsonden Gasgehalte, die bis zu 10 % zu klein sind. Höhere Fehler wurden im Bereich hoher Wassergeschwindigkeiten (4 m/s) beobachtet. Die Unterbewertung des Gasgehalts durch die Nadelsonden ist auf die Beeinflussung der Strömung zurückzuführen. Durch das Wirken der Oberflächenspannung weichen kleinere Blasen der Sondenspitze aus, wenn sie am Rand getroffen werden. Wie sich später zeigte, ist dieser Meßfehler bei den Druckstoßexperimenten von untergeordneter Bedeutung, da es dort vorrangig um die Verfolgung der Phasengrenze bei der Ausbreitung der Kavitationsblase geht.

5.2.3 Ermittlung der Meßgenauigkeit der Gittersensoren

In Bild 5.8 ist der Vergleich zwischen den beiden Gittersensoren mit 8 x 8

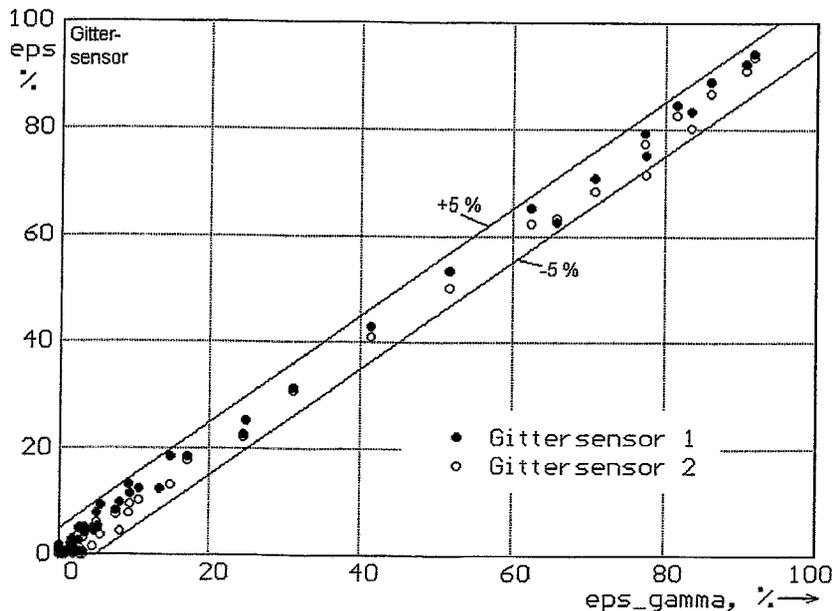
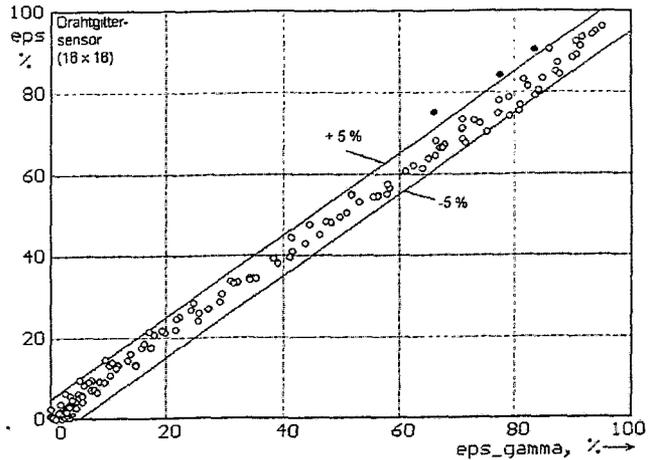


Bild 5.8 Gegenüberstellung Gittersensoren - Gamma-Desitometer, lineare Mittelwerte des Gasanteils

Elektroden und dem Gamma-Densitometer dargestellt. Die maximale Abweichung beträgt $\pm 5\%$. In der Tendenz liefert der zweite Sensor in Strömungsrichtung etwas geringere Gasgehalte, als der erste. Dies ist ein Indiz für eine gewisse Strömungsbeeinflussung. Es ist zu vermuten, daß einige Blasen beim Durchlaufen des ersten Sensors zerteilt werden. Der feindisperse Anteil wird anschließend möglicherweise vom zweiten Sensor nicht mehr wahrgenommen. Insgesamt ist die Übereinstimmung gut und es kann davon ausgegangen werden, daß die Meßgenauigkeit für die Druckstoßexperimente ausreicht.

5.2.4 Ermittlung der Meßgenauigkeit des Drahtgittersensors

Der Drahtgittersensor NW50 mit 16×16 Meßpunkten und Elektroden mit einem Durchmesser von $120 \mu\text{m}$ wurde für die Kalibrierung der Ultraschallaufnehmer als Referenzinstrument genutzt, weil aus organisatorischen Gründen mit dem Gamma-Densitometer nur ein Teil der Versuchsmatrix realisiert werden konnte, für den Drahtgittersensor jedoch für alle Matrixpunkte Meßergebnisse vorliegen. Deshalb muß an dieser Stelle ein Vergleich zwischen Drahtgittersensor und Gamma-Densitometer erfolgen, der in Bild 5.9 dargestellt ist.



Die Übereinstimmung ist beim Drahtgittersensor ebenfalls überall besser als $\pm 5\%$. Lediglich bei drei Meßpunkten, die durch eine Wasserleerrohrgeschwindigkeit von 4 m/s gekennzeichnet sind, kommt es zu einer größeren Abweichung, möglicherweise durch elastische Deformation der Sensordrähte.

Bild 5.9 Vergleich Drahtgittersensor - Gamma-Densitometer

5.2.5 Kalibrierung der Ultraschallaufnehmer

Zunächst wurden die Ausgangsspannungen der Elektronikeinheit, die proportional zur Intensität von durchgehendem bzw. reflektiertem Ultraschallsignal sind, über die Meßzeit von 120 s gemittelt und mit dem linearen Mittelwert des mit dem Drahtgittersensor gemessenen Gasgehalts verglichen. Dabei ist festzustellen, daß eine verwertbare Abhängigkeit nur beim Transmissionssignal im Bereich von Gasgehalten kleiner 12.5% vorliegt (Bild 5.10). Das zeitlich gemittelte Reflexionssignal weist eine sehr komplexe Abhängigkeit vom mittleren Gasanteil in der Rohrleitung auf, aus der nicht direkt auf den volumetrischen Gasanteil zurückgeschlossen werden kann. Dabei sind die Änderungen der Signalamplitude relativ gering (Bild 5.11).

Für den Bereich $\varepsilon < 12.5\%$ ist eine näherungsweise Kalibrierung der Transmissionsintensität möglich. Aus dem Spannungssignal U_{tr} kann nach folgender Formel ein volumetrischer Gasgehalt abgeschätzt werden:

$$\varepsilon \approx \frac{3400 \text{ mV} - U_{tr}}{1600 \text{ mV}} \cdot 12.5 \% \quad U_{tr} \text{ in mV, } \varepsilon \text{ in \%} \quad (5.15)$$

Die Genauigkeit ist dabei stark eingeschränkt (Bild 5.12). Die Versuchspunkte, die bei einer Leerrohrgeschwindigkeit des Wassers von größer 2.5 m/s aufgenommen wurden, werden durch die Beziehung (5.15) schlecht wiedergegeben. Ansonsten liegen die Punkte innerhalb eines absoluten Fehlerintervalls von ± 2 % Gasgehalt. Berücksichtigt man, daß die Kalibrierung nur bis zu einem Dampfgehalt von 12.5 % angewandt werden kann, dann ist der relative Fehler bezogen auf diesen Endwert in der Größenordnung von 10 %.

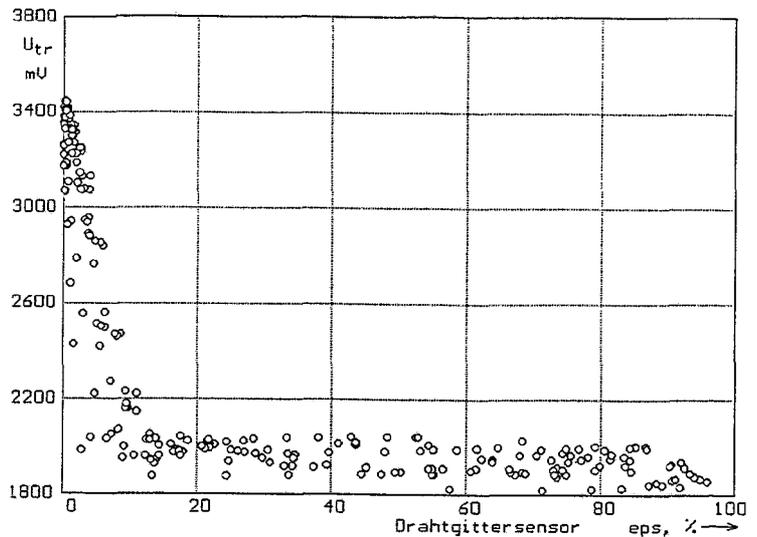


Bild 5.10 Ultraschall-Transmissionssignal in Abhängigkeit vom mittleren Gasanteil

Die Ultraschallsensoren wurden dennoch an der Versuchsanlage in Oberhausen probeweise eingesetzt. Das Verhalten des Transmissionssignals nach Bild 5.10 ließ hoffen, daß die Ultraschallsensoren in ähnlicher Weise wie die Nadelsonden eine Detektion des Vorhandenseins einer Kavitationsblase zulassen. Bei senkrechter Durchschallung der Rohrleitung wird der Ultraschallstrahl beim Eintreffen der Blase praktisch vollständig abgeschattet, was sich im Signal entsprechend widerspiegelt.

Von der Verwendung von Mustererkennungsverfahren, die nach eigenen Ergebnissen besser geeignet sind, um die Signale von Ultraschallaufnehmern hinsichtlich der Parameter einer Zweiphasenströmung auszuwerten, wurde abgesehen, da es bei den Druckstoßversuchen um eine zeitlich hochaufgelö-

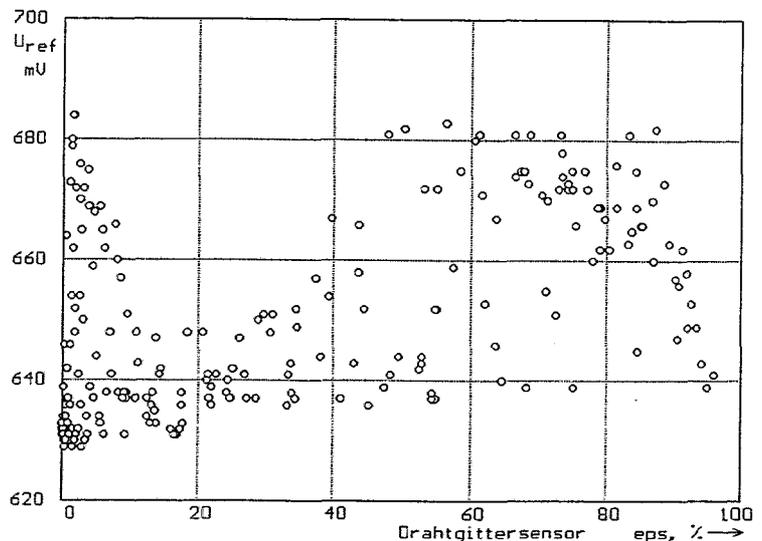


Bild 5.11 Ultraschall-Reflexionssignal in Abhängigkeit vom mittleren Gasanteil

ste Detektion der Kavitationsblase im Millisekundenbereich ging. Für die Merkmalsextraktion, die bei der Mustererkennung durchgeführt werden muß, sind jedoch zumindest Meßzeiten in der Größenordnung von Sekunden erforderlich.

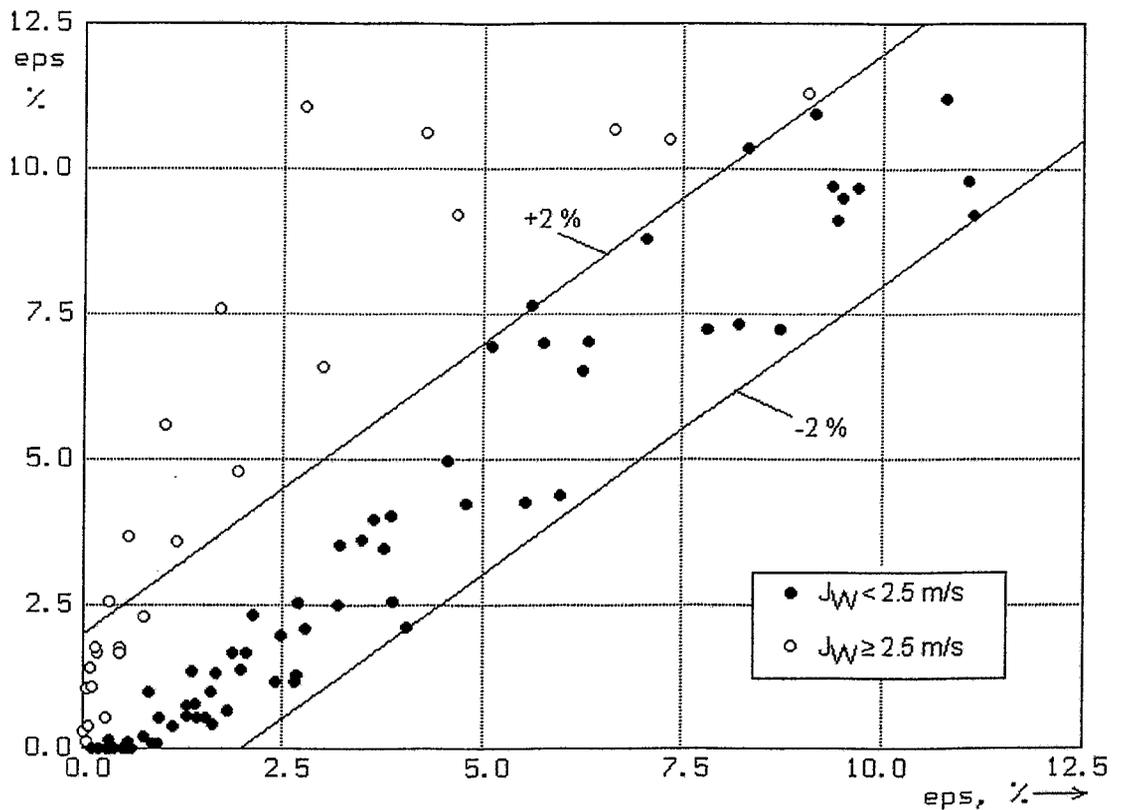


Bild 5.12 Dampfgehaltsmessung durch Ultraschalltransmission, Vergleich der Gasanteile nach Gl. (5.15) mit den Werten des Drahtgittersensors

6 Ergebnisse der Schnellschlußversuche

6.1 Systematik der Schnellschlußversuche

Die Schnellschlußversuche an der Druckstoßversuchsanlage erfolgten bei unterschiedlichen Randbedingungen und Schaltzuständen. Variiert wurde Typ und Einbauposition der Schnellschlußarmatur, die Geometrie der Rohrleitungsführung, die Nennweite der Rohrleitung, die Strömungsgeschwindigkeit vor Schließen der Armatur, die Dynamik des Schließvorgangs sowie die Zusammensetzung des Strömungsmediums. Zum Einsatz kamen drei Arten von Absperrarmaturen: (1) eine exzentrische Klappe, (2) eine zentrische Klappe sowie (3) ein Stellventil. Die Armatur befand sich entweder im vorderen Teil der Rohrleitung (Klappe im Vorlauf) zwischen Pumpe und Rohrbrücke ($x=18.2$ m) oder im Rücklauf kurz vor dem Vorratsbehälter ($x=191.7$ m). In beiden Fällen war die Armatur in einen horizontalen Abschnitt der Rohrleitung eingebaut. Die Experimente wurden an beiden verfügbaren Rohrlungsdurchmessern durchgeführt, also sowohl für DN100 als auch für DN50. Dabei überwiegen die Versuche für DN100. Bei einigen Versuchen ersetzte ein horizontaler Bypass die Rohrbrücke. Die Strömungsgeschwindigkeit variierte bei den Versuchsreihen im Bereich von 0.5 bis 6 m/s.

Tabelle 6.1 Realisierte Versuchsvarianten bei den Schnellschlußversuchen

Nennweite der Rohrleitung			DN100				DN50	
Schaltzustand			Rohrbrücke		Bypass		Rohrbrücke	
Position der Armatur			Vorlauf	Rücklauf	Vorlauf	Rücklauf	Vorlauf	Rücklauf
Armatur	Dynamik	Luftzuspeisung						
exzentr. Klappe	normal	nein	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
		ja	B-1			B-4		
	verzögert	nein	C-1					
		Teilschl.	nein	D-1				
zentr. Klappe	normal	nein	E-1	E-2				
		ja						
	verzögert	nein						
		Teilschl.	nein	F-1	F-2			
Stell-Ventil	normal	nein	G-1	G-2				
		ja						
	verzögert	nein	H-1					
		Teilschl.	nein					

Zur Untersuchung des Einflusses der Schließgeschwindigkeit und zur detaillierteren Betrachtung der strömungsmechanischen Vorgänge wurden Versuche mit verminderter Schließgeschwindigkeit und Teilschlußversuche durchgeführt. Für letzteres wurde eine Klappe mit einem mechanischen Anschlag versehen, der den Schließvorgang bei einem voreingestellten Winkel stoppte. In speziellen Experimenten mit Lufteinspeisung wurde die dämpfende Wirkung eines nichtkondensierbaren Gases

auf die Amplitude der Druckstöße untersucht. Tabelle 6.1 enthält eine Aufstellung der realisierten Kombinationen von Versuchsvarianten. Im weiteren wird die in Tabelle 6.1 eingeführte Kurzbezeichnung für den Typ des jeweiligen Experiments genutzt. Die fett gedruckten Positionen sind diejenigen Varianten, auf die im Rahmen dieses Berichts näher eingegangen wird.

6.2 Kavitation hinter der schnellschließenden Klappe

6.2.1 Klappe im vorderen Teil der Rohrleitung DN100 mit Rohrbrücke

Im Anfangszustand ist die Rohrleitung vollständig mit Wasser gefüllt. Die Strömungsgeschwindigkeit ist konstant und wird über die Pumpendrehzahl eingestellt. Zeitsynchron mit Schnellschluß der Klappe erfolgte der Start der Meßwertaufzeichnung. Die Schließzeit der Klappe betrug bei den in diesem Abschnitt betrachteten Vorgängen einheitlich 100 ms. Im folgenden wird als Beispiel ein Versuch bei 4 m/s Anfangsgeschwindigkeit (Versuchsnummer: 133cbm07) betrachtet (Bild 6.1).

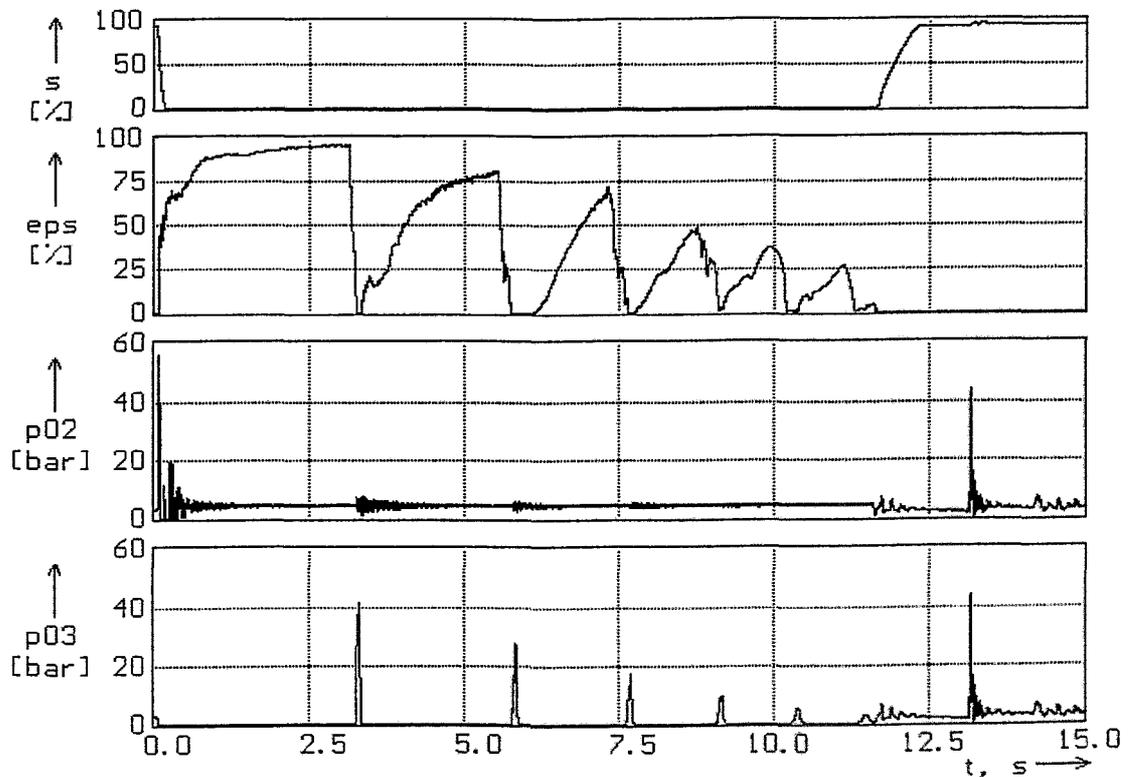


Bild 6.1 Verläufe der Klappenstellung (s), des mittleren Dampfgehalts (eps) und der Drücke vor ($p02$) und hinter ($p03$) der Klappe (133cbm07)
DN100, $v_0=4$ m/s, Klappe im Vorlauf mit Brücke (A-1)

Bereits während des Schließvorgangs kommt es zur Abbremsung der Strömung infolge der zunehmenden Querschnittsversperrung. Nachdem die Klappe vollständig geschlossen ist, sind die Rohrleitungsabschnitte davor und dahinter strömungsmechanisch weitgehend entkoppelt. Vor der Klappe kommt es sofort zu einem starken Druckanstieg, wobei die Amplitude annähernd dem Gesetz von Joukovski folgt. Die Druckwelle setzt sich im einphasigen Medium über die Pumpe bis in das Reservoir fort, wo sie reflektiert wird. Sie kehrt als Entspannungswelle zurück und wird an der geschlossenen Klappe wiederum reflektiert. Dieser Vorgang wiederholt sich einige Male. Die daraus resultierende Folge von Druckstößen ist nach ca. 0.5 s beendet (Bild 6.1, p02).

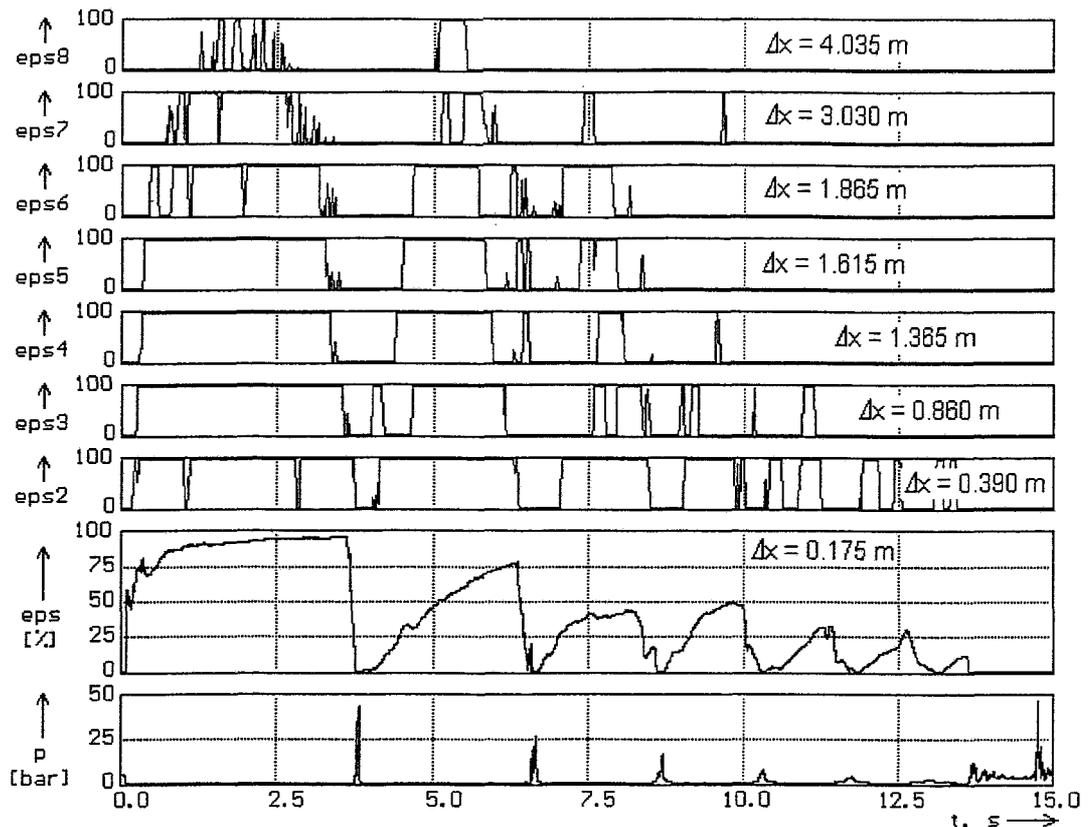


Bild 6.2 Dampfgehaltsverläufe und Druck hinter der Klappe (165cbm02)

DN100, $v_0=5$ m/s, Klappe im Vorlauf mit Brücke (A-1)

eps: mittlerer Dampfgehalt Gittersensor, 0.15 m hinter Klappe

eps2 - eps8: lokale Dampfgehalte Nadelsonden

Δx : Abstand Achse Klappe - Sensor

Anders verläuft der Prozeß hinter der Klappe. Durch die Trägheit der strömenden Flüssigkeit sinkt der Druck ab und erreicht den Sättigungsdruck für die im Rohr herrschende Temperatur. Es kommt zur Verdampfung und es bildet sich eine Kavitationszone heraus, die sich in Strömungsrichtung ausdehnt. Der mittlere Dampfgehalt im Rohrleitungsquerschnitt 0.15 m hinter der geschlossenen Klappe erreicht

Werte um 90 % (Bild 6.1, eps). Infolge der Druckdifferenz zwischen dem Gegen-
druck am Leitungsende und dem Sättigungsdruck wird die Flüssigkeitssäule konti-
nuierlich abgebremst und danach in entgegengesetzter Richtung beschleunigt.
Nach etwa 3.3 s prallt die Wassersäule auf die geschlossene Klappe. Die plötzliche
Abbremsung löst eine Druckwelle (Kavitationsschlag) aus, die von der Klappe weg
in die Rohrleitung zurückläuft. Die Druckspitzen führen über die Elastizität der Klap-
pe auch zu einer Anregung der Flüssigkeitssäule vor der Klappe, die sich im Signal-
verlauf des Drucks p_{02} widerspiegelt. Die Amplitude der Kavitationsschläge wird
von der Flüssigkeitsgeschwindigkeit im Moment des Auftreffens bestimmt. Sie ist mit
der Amplitude des Druckstoßes vor der Klappe vergleichbar, da die Geschwindigkeit
beim Auftreffen nur geringfügig kleiner ist als die Strömungsgeschwindigkeit vor
dem Schnellschluß.

Die Druckwelle wird am Reservoir reflektiert und kehrt als Entspannungswelle zu-
rück, so daß sich nach kurzer Zeit erneut eine Dampfblase bildet. Der Prozeß wie-
derholt sich mehrere Male. Durch die Dissipation in der Rohrleitung nimmt die Strö-
mungsgeschwindigkeit nach der Reflexion jedoch immer weiter ab, so daß die ma-
ximale Ausdehnung der Kavitationsblase, die zwischen den Druckstößen verstreichen-
den Zeit und die Amplitude der Druckstöße abnehmen. Die abnehmende Aus-
dehnung der Dampfblase wird besonders gut durch die Signale der Nadelsonden il-
lustriert, wie z.B. in Versuch 165cbm02, der in Bild 6.2 dargestellt ist.

Die Sonden 2 bis 8 waren bei betrachteter Versuchsanordnung mit wachsender Zu-
ordnungsnummer in zunehmendem Abstand hinter dem Gittersensor angeordnet.
Es ist gut zu erkennen, wie die Dampfblase sich mit abnehmender Geschwindigkeit
ausdehnt, um nach Erreichen von Sonde 8 wieder mit wachsender Geschwindigkeit
zu kollabieren. Nach dem zweiten Kondensationsschlag erreicht die Dampfblase nur
noch die Sonde 7, nach dem dritten nur noch die Sonde 4 usw. Das von den Son-
den gelieferte Abbild der Kavitationsblase wird zunehmend durch Gasblasen ge-
stört, die sich beim Sieden durch das Ausgasen von Luft bilden, die im Wasser ge-
löst war.

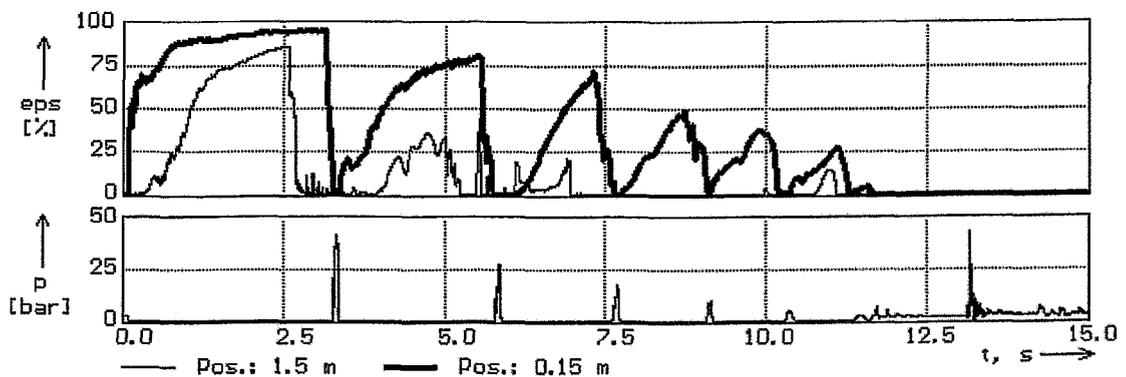


Bild 6.3 Gegenüberstellung der Signale des Gittersensors auf zwei unter-
schiedlichen axialen Positionen und Druckverlauf hinter der Klappe

DN100, $v_0=4$ m/s, Klappe im Vorlauf mit Brücke (A-1)

Der beschriebene Vorgang der axialen Ausbreitung der Dampfblase läßt sich auch anhand der Gittersensordaten gut darstellen (Bild 6.3). Hierzu wurden die Ergebnisse zweier Versuche zusammengefaßt, die mit gleichen Randbedingungen, aber unterschiedlicher Gittersensorposition durchgeführt wurden. Es handelt sich um die Versuche 133cbm07 und 133cbm02. Bei letzterem war der Gittersensor 1.5 m von der Klappe entfernt.

Man erkennt auch hier deutlich, wie die Kavitationsblase sich in axialer Richtung ausbreitet. Sie erreicht die Sensorposition 1.5 m erst ca. 1 s später als die Position 0.15 m. Der Kollaps verläuft in umgekehrter Reihenfolge. Nach dem dritten Kavitationsschlag wird die zweite Sensorposition nicht mehr erreicht.

Wie die Nadelsonden, so registriert auch der Gittersensor Luftblasen. Das ist besonders deutlich im Zeitintervall zwischen ca. 2.5 und 3 s zu erkennen, wenn der Flüssigkeitsschwall die Position 1.5 m bereits erreicht hat und dennoch vereinzelt Gasgehaltspeaks beobachtet werden. Das Signal wird durch die Gasblasen mit fortschreitender Zeit immer unregelmäßiger.

Der Gittersensor ermöglicht wesentlich detailliertere Einblicke in die Vorgänge hinter der Klappe, wenn man die momentanen Dampf- bzw. Gasgehaltsverteilungen betrachtet. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 4 m/s setzt die Verdampfung bei $t=100$ ms ein. Zum Zeitpunkt $t=105$ ms erreicht der Dampfgehalt bereits 36 %.

Wie Bild 6.4 zeigt, ist der Dampf jedoch nicht gleichmäßig im Querschnitt verteilt. Dieses Bild zeigt die Dampfgehaltsverteilung in der Meßebene 0.15 m hinter der Klappe. Der Betrachter blickt entgegen der Strömungsrichtung auf die Klappe. Infolge der Drehbewegung der Klappe, die sich auf der linken Bildhälfte vom Betrachter weg bewegt, ist dort eine intensivere Verdampfung zu beobachten. Etwas später, bei $t=150$ ms, bildet sich Dampf in Form von Blasen auf, die im gesamten Querschnitt auftreten (Bild 6.5). Nachfolgend findet Stratifikation statt, d.h. es ist genügend Zeit für die Phasenseparation vorhanden und es bildet sich eine Schichtströmung heraus. Dieser Vorgang kann am besten durch eine sog. Pseudo-Seitenansicht wiedergegeben werden. Hierzu werden die momentanen Dampfgehaltsverteilungen, gemessen auf einem senkrecht durch den Rohrleitungsquerschnitt verlaufenden Durchmesser, in Falschfarben als Zeitsequenz nebeneinander geplottet. Es entsteht der Eindruck einer Seitenansicht, wobei sich in horizontaler Richtung nicht die räumliche Ausdehnung, sondern die Zeitachse erstreckt.

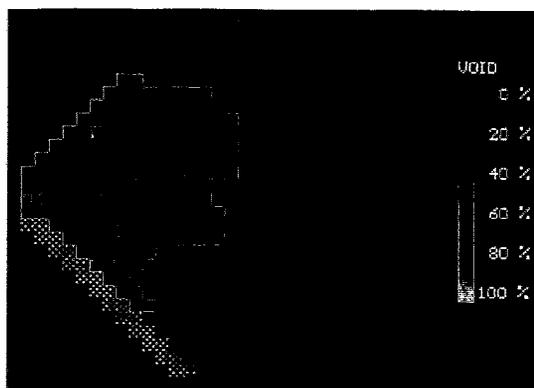
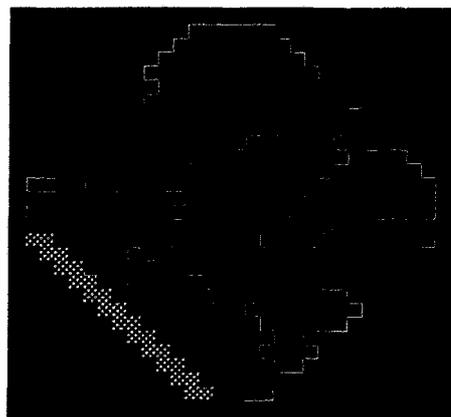


Bild 6.4 Dampfgehaltsverteilung in der Meßebene $\Delta x=0.15$ m

$v_0=4$ m/s, $t=105$ ms

Auf diese Weise wurde Bild 6.6. erhalten. Es handelt sich wiederum um Versuch 133cbm07. Man erkennt die anfängliche Verdampfung, wobei sich die Blasen über die Höhe verteilt bilden. Anschließend kommt es zur Separation. Die Gerinnehöhe des Wassers nimmt in weiteren Verlauf ab, was darauf zurückzuführen ist, daß das Wasser im Gerinne noch einen gewissen Impuls besitzt und von der Klappe weg strömt. Nach ca. 3.3 s trifft schließlich der Schwall zurückkommend wieder an der Sensorposition ein und der Vorgang wiederholt sich.



An der Sensorposition bei 1.5 m ist eine Verdampfung im gesamten Querschnitt nur noch schwach zu erkennen (Bild 6.7). Es kommt vielmehr nach ca. 600 ms zum Beginn eines kontinuierlichen Füllstandsabfalls, der durch das Durchlaufen der Front der Kavitationsblase hervorgerufen wird.

Bild 6.5 Dampfverteilung bei $t=150$ ms

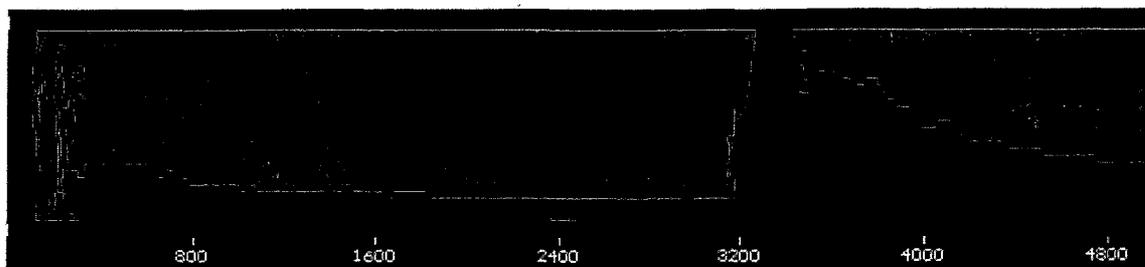


Bild 6.6 Pseudo-Seitenansicht der Verdampfung bei Kavitation, Sensorposition 0.15 m
DN100, $v_0=4$ m/s, 133cbm07 (A-1), x-Achse: Zeit in ms, y-Achse: Höhe

Der zurücklaufende Flüssigkeitsschwall trifft bei ca. $t=2.6$ s ein und ist durch einen raschen Füllstandsanstieg gekennzeichnet. Dabei wird das zweiphasige Medium kurzzeitig verwirbelt, so daß Blasen im ganzen Querschnitt auftreten. Nach Durch-

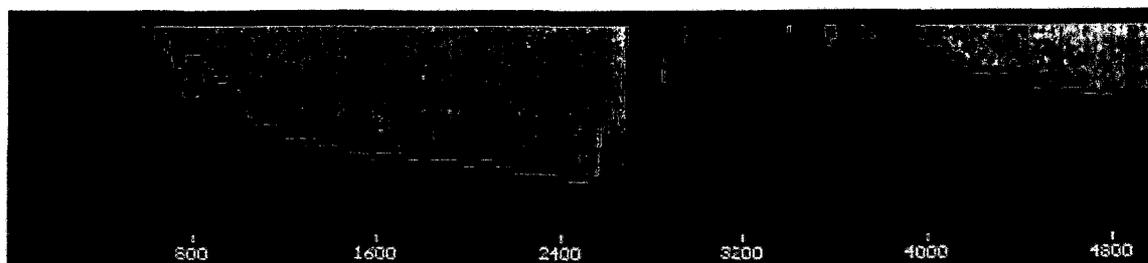


Bild 6.7 Pseudo-Seitenansicht der Verdampfung bei Kavitation, Sensorposition 1.5 m, Zeitauflösung: 8 ms
DN100, $v_0=4$ m/s, 133cbm02 (A-1), x-Achse: Zeit in ms, y-Achse: Höhe

laufen des Schwallis werden im oberen Bereich der Rohrleitung noch Blasen beobachtet, die mit großer Wahrscheinlichkeit ausgegaste Luft darstellen. Der eben genannte Prozeß ist in Bild 6.8 noch einmal ausschnittsweise in maximaler Zeitauf-
 lösung abgebildet.

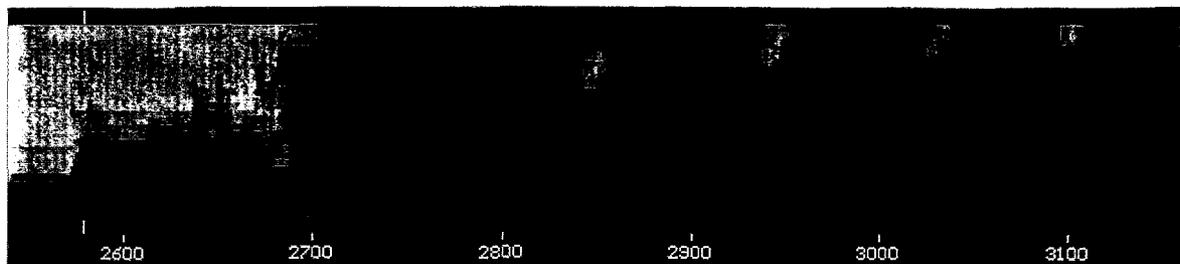


Bild 6.8 Ausschnitt aus Bild 6.7, maximale Zeitauf-
 lösung von ca. 1 ms

Der Kavitationsprozeß ist stark von der Anfangsgeschwindigkeit der Flüssigkeit abhängig. Mit steigender Geschwindigkeit erhöht sich die Amplitude der Druckstöße und die maximale Ausdehnung der Kavitationsblase wächst an. Das erklärt sich dadurch, daß die zur Abbremsung der Flüssigkeitssäule zur Verfügung stehende Druckdifferenz aus Gegendruck und Sättigungsdruck annähernd unverändert bleibt, wodurch eine längere Zeit verstreicht, bis die Strömungsumkehr erfolgt. Im Ergebnis

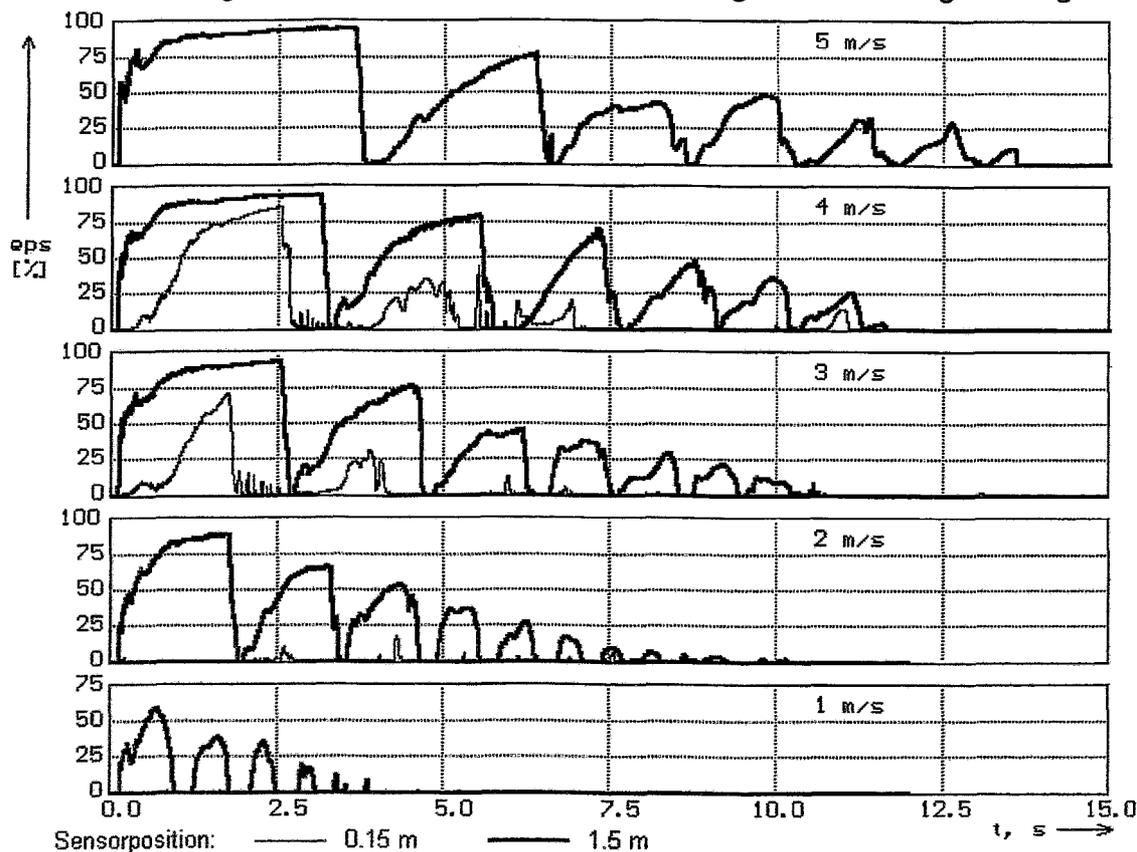


Bild 6.9 Dampfgehalt hinter der Klappe bei verschiedenen Anfangs-
 geschwindigkeiten, Versuchstyp A-1

wächst die Zeit, die bis zum ersten Kavitationsschlag vergeht. Im folgenden Bild 6.9 werden Dampfgehaltsverläufe verglichen, die bei verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten gemessen wurden.

In Bild 6.9 sind neben den Ergebnissen, die 0.15 m hinter der Klappe erhalten wurden, auch die Verläufe des Dampfgehalts auf der Position $x=1.5$ m eingetragen, soweit entsprechende Experimente durchgeführt wurden (Die Geschwindigkeit von 5 m/s wurde nur mit der ersten Sensorposition realisiert). Es zeigt sich, daß die Kavitationsblase erst bei einer Geschwindigkeit von $v_0 = 3$ m/s die zweite Meßposition erreicht hat. Bei den Versuchen mit 1 und 2 m/s Anfangsgeschwindigkeit treten in der zweiten Meßebeine erst nach dem ersten Kavitationsschlag vereinzelte Blasen auf, die offensichtlich ausgegaste Luft darstellen.

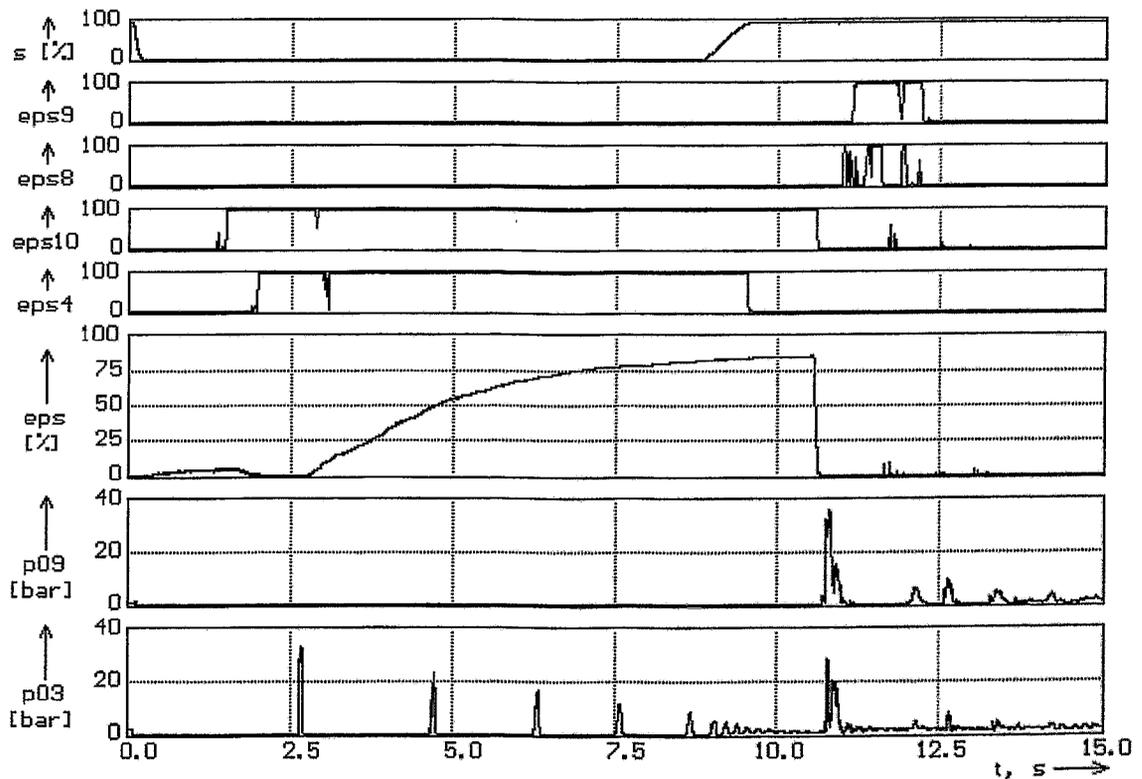


Bild 6.10 Verlauf des mittleren Dampfgehalts im horizontalen Teil der Rohrleitung auf der Rohrbrücke, Nadelsondensignale und Druckverläufe, $v_0=3$ m/s, Versuch 99cbm26, Versuchstyp A-1

p03 - Druck hinter Klappe, p09 - Druck am vorderen Krümmer auf der Rohrbrücke, eps - mittlerer Dampfgehalt, Gittersensor, eps4 - Nadelsonde am vorderen Krümmer auf der Rohrbrücke, eps10 - Nadelsonde im horizontalen Abschnitt der Rohrbrücke, eps08 - Sonde am Hochpunkt des Rücklaufs, eps09 - Sonde im abfallenden Schenkel des Rücklaufs, s - Stellungsrückmeldung der Klappe

Bei einer Reihe von Versuchen war der Gittersensor auf der Rohrbrücke angeordnet. Dies bietet die Möglichkeit, die Prozesse näher zu untersuchen, die zu den Kondensationsschlägen führen, die nach dem Wiederöffnen der Klappe auftreten (vgl. Bild 6.1). Bild 6.10 zeigt hierzu das Ergebnis eines Versuchs mit $v_0 = 3 \text{ m/s}$ (99cbm26).

Wie zu erkennen ist, kommt es nach dem Schließen der Armatur zur Dampfbildung auf der Rohrbrücke. Sonde 10 zeigt, daß eine deutliche Verdampfung nach der halben Zeit bis zum ersten Kavitationsschlag einsetzt, d.h. etwa im Moment der Strömungsumkehr. Sonde 10 befindet sich am höchsten Punkt der Anlage, deshalb herrscht dort der kleinste Druck. Aus diesem Grund tritt Dampf an Sonde 4 erst später auf. Der Gittersensor registriert einen starken Anstieg des mittleren Dampfgehalts nach dem ersten Kavitationsschlag. Der Rohrleitungsquerschnitt im horizontalen Abschnitt der Brücke wird kontinuierlich freigelegt. Da die Freilegung langsam von statten geht, reicht die Zeit für eine praktisch vollständige Separation im Querschnitt aus und es bildet sich eine Schichtung heraus (Bild 6.11). Die Heraus-

bildung dieser Schichtung bleibt vollständig unbeeinflusst durch die im vorderen Teil der Anlage ablaufenden Kavitationsvorgänge mit ihrer sich wiederholenden Strömungsumkehr. Das äußert sich auch darin, daß der Geber p09 die Druckspitzen von p03 nicht registriert. Die Herausbildung dieser

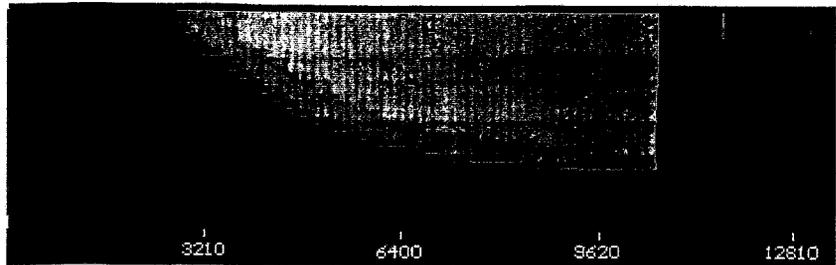


Bild 6.11 Pseudo-Seitenansicht der Strömung im horizontalen Abschnitt der Rohrbrücke, 99cbm27 (A-1), $v_0=3 \text{ m/s}$, x-Achse: Zeit in ms, y-Achse: Höhe

Dampfblase hat jedoch umgekehrt einen wesentlichen Einfluß auf die Vorgänge im vorderen Teil der Anlage. In der Blase auf der Rohrbrücke herrscht, wie auch in den Kavitationsblasen hinter der Klappe, Sättigungsdruck, hervorgerufen durch den hydrostatischen Druckabfall im senkrechten Rohrabschnitt, der auf die Brücke führt. Solange wie diese Blase existiert, ist der Prozeß im vorderen Teil der Anlage von den Vorgängen in der übrigen Rohrleitung entkoppelt. Der Gegendruck für die Abbremsung der Wassersäule im vorderen Teil der Leitung ergibt sich nur noch aus der genannten hydrostatischen Druckdifferenz und einem kleineren Reibungsanteil, da die Drücke an beiden Enden der Wassersäule, also in den Kavitationsblasen an der Klappe und auf der Brücke, praktisch gleich sind. Die Rohrbrücke führt deshalb zu einer Verkürzung der abzubremsenden Wassersäule, wodurch sich die Zeitabstände zwischen den Kavitationsschlägen verkürzen, verglichen zum Verhalten ohne Rohrbrücke. Dieser Effekt wird im nächsten Abschnitt anhand der Versuche mit Bypass der Rohrbrücke näher untersucht.

Das weitere Verhalten der Kavitationsblase auf der Brücke hängt davon ab, ob die Klappe bei laufender Pumpe wieder geöffnet wird oder nicht. Im Versuch in Bild 6.10 bzw. 6.11 wurde nach ca. 8 s das Signal zum Öffnen der Klappe gegeben. Der Öffnungsvorgang dauerte etwa 1 s. Der Druck hinter der Klappe steigt wieder auf den Wert an, der vor dem Schließen anstand. Die Wassersäule setzt sich in Bewe-

gung und erreicht zunächst die Sonde 4, danach etwa zeitgleich die Sonde 10 und den Gittersensor. Zu diesem Zeitpunkt tritt ein heftiger Kavitationsschlag auf, der durch den Kollaps der Blase auf der Brücke verursacht wird. Die Druckspitze, die vom Geber p09 am vorderen Krümmer auf der Rohrbrücke gemessen wird, wird auch von p03 gemessen, hat dort jedoch eine etwas geringere Höhe. Die Tatsache, daß die Druckspitze überhaupt von p03 nachgewiesen wird, deutet darauf hin, daß zu diesem Zeitpunkt im Rohrleitungsabschnitt zwischen p03 und p09 kein Dampf mehr vorhanden ist und sich die Druckwelle fast ungedämpft ausbreiten kann.

Daß dieser Kavitationsschlag tatsächlich durch das Öffnen der Klappe ausgelöst wird, kann durch Betrachtung eines weiteren Versuchs (99cbm27) bewiesen werden, bei dem die Klappe geschlossen gehalten wurde. In diesem Fall tritt ein Druckstoß mit vergleichbarer Amplitude nicht auf. Dennoch kommt es spontan nach ca. 16 s zu einem Druckstoß, wenngleich auch nur mit einem Maximaldruck von etwa 10 bar. Sowohl der Gittersensor als auch die Sonden 4 und 10 detektieren den Kollaps der Dampfblase auf der Brücke, hervorgerufen durch das Zurückströmen von Flüssigkeit aus der Leitung hinter der Brücke. Im weiteren Verlauf kommt es noch wiederholt zu derartigen Druckspitzen (bei $t=29$ s und 42 s), die jedoch stark an Amplitude abnehmen. Der Dampfgehaltsverlauf beweist, daß hierfür ebenfalls der Kollaps der Dampfblase verantwortlich ist, die sich mehrmals neu bilden kann.

Während Sonde 10 weiter ähnliche Dampfgehaltsschwankungen zeigt, wie der Gittersensor, erreicht die Kavitationsblase beim zweiten Mal (und nachfolgend) die Position der Sonde 4 nicht mehr, die sich etwas unterhalb des höchsten Punkts der Leitung befindet.

Die großen Zeitdifferenzen zwischen den genannten Druckmaxima erklären sich aus der geringen treibenden Druckdifferenz für die Verzögerung und Beschleunigung der Wassersäule in der Leitung ab Rohrbrücke sowie in der großen Länge der Leitung bis zum Reservoir. Im Reservoir wirkt der Atmosphärendruck auf die freie Wasseroberfläche. Auf der Rohrbrücke herrscht bei Vorhandensein der Kavitationsblase Sättigungsdruck, der nahe bei Null bar liegt. Die Druckdifferenz, die die Wassersäule in der Rückleitung in Richtung der Rohrbrücke beschleunigt, ist durch den Atmosphärendruck plus hydrostatische Druckzunahme im Reservoir minus hydrostatische Druckabnahme im vertikalen Rohrabschnitt hinter der Brücke minus Sättigungsdruck minus Reibungsdruckverlust in der Rohrleitung bestimmt. Da die Rohrbrücke das Reservoir überragt, ist die Druckdifferenz kleiner als der Atmosphärendruck, woraus sich die relativ große Periode von ca. 13 s erklärt.

Bemerkenswert ist weiterhin das Auftreten von Dampf am Hochpunkt in der Rückleitung einige Sekunden nach dem Wiederöffnen der Klappe (Bild 6.10). Die Druckwelle, hervorgerufen durch den großen Kavitationsschlag beim Kollaps der Blase auf der Rohrbrücke läuft bis in das Reservoir am Ende der Rohrleitung. Dort wird die Welle als Entspannungswelle reflektiert. Am deltaförmigen Hochpunkt in der Rückleitung reicht die Druckabnahme durch die Entspannungswelle zusammen mit dem hydrostatischen Druckverlust schließlich aus, um den Sättigungsdruck zu erreichen. Entsprechend detektieren die Sonden 8 und 9 die Dampfblasen. Der Kollaps dieser Blasen führt zu den kleineren Druckstößen im Bereich von 12 - 13 s.

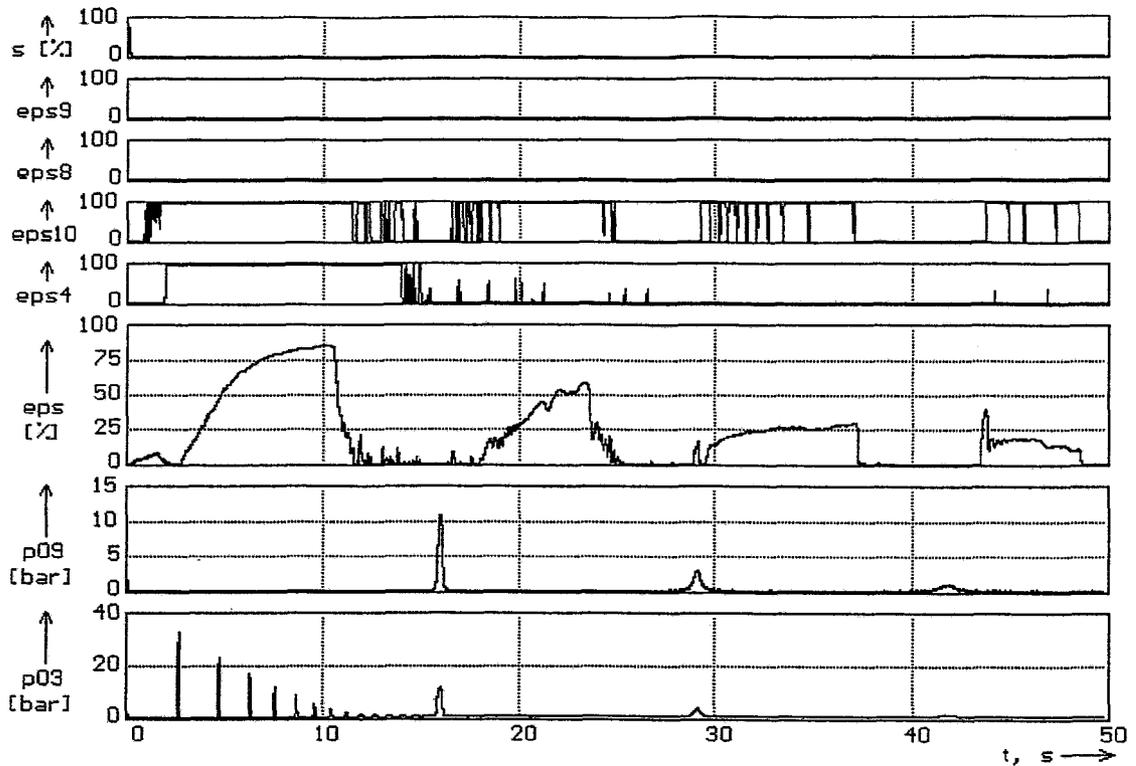


Bild 6.12 Verlauf des mittleren Dampfgehalts im horizontalen Teil der Rohrleitung auf der Rohrbrücke, Nadelsondensignale und Druckverläufe, $v_0=3$ m/s, Versuch 99cbm26, Versuchstyp A-1

p03 - Druck hinter Klappe, p09 - Druck am vorderen Krümmer auf der Rohrbrücke, eps - mittlerer Dampfgehalt, Gittersensor, eps4 - Nadelsonde am vorderen Krümmer auf der Rohrbrücke, eps10 - Nadelsonde im horizontalen Abschnitt der Rohrbrücke, eps08 - Sonde am Hochpunkt des Rücklaufs, eps09 - Sonde im abfallenden Schenkel des Rücklaufs, s - Stellungsrückmeldung der Klappe

Diese Erklärung wird dadurch erhärtet, daß die Sonden 8 und 9 keinen Dampf detektieren, wenn die Klappe geschlossen bleibt (Bild 6.12). Die Amplitude der spontanen Druckspitzen reicht in diesem Fall nicht aus, um am Reservoir eine Entspannungswelle zu induzieren, die im Hochpunkt zur Absenkung des Drucks bis auf Sättigungsdruck führen kann.

6.2.2 Versuche mit Bypass der Rohrbrücke

Für die im folgenden beschriebenen Versuche wurde die Rohrbrücke durch ein gerades, horizontales Rohrstück (Bypass) ersetzt. Hierdurch wurde das Verhalten der Rohrleitung wesentlich verändert. Die Höhe der Rohrbrücke von 9.6 m bewirkt, daß infolge des hydrostatischen Druckabfalls der Druck auf der Rohrbrücke bereits bei ruhender Flüssigkeit fast auf den Sättigungsdruck der Flüssigkeit abfällt. So führt bereits eine kleine Verzögerung der Flüssigkeitssäule zum Abreißen der Strömung auf der Brücke. Mit dem Bypass findet diese Unterbrechung der Flüssigkeitssäule nicht statt. Infolge dessen steigt die Zeit für die Strömungsumkehr des Wassers nach dem Schnell-

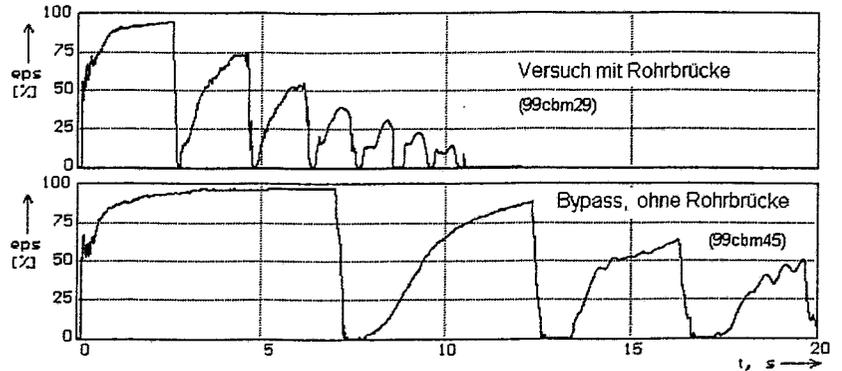


Bild 6.13 Vergleich der Dampfgehaltsverläufe 0.15 m hinter der Klappe mit und ohne den Einfluß der Rohrbrücke, $v_0=3$ m/s, Versuchstypen A-1 und A-3

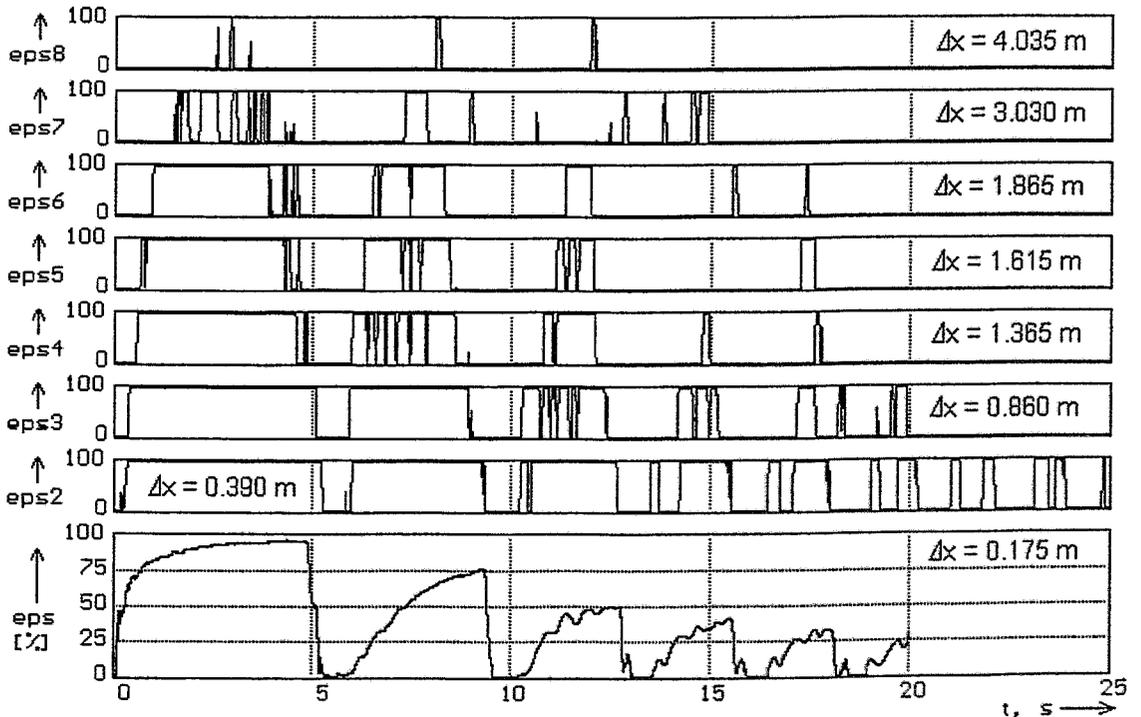


Bild 6.14 Verlauf des mittleren Dampfgehalts und Sondensignale bei Schnellschluß in der Rohrleitung ohne Rohrbrücke, $v_0=2$ m/s, Versuch 66cbm28, Versuchstyp A-3, Δx - Abstand Achse Klappe - Sensor

schluß der Klappe stark an. Wie in Bild 6.13 ersichtlich ist, Verstreichen bei $v_0=3$ m/s bis zum Auftreten des ersten Kavitationsschlages ca. 7.2 s. Im Vergleichsexperiment mit Rohrbrücke tritt der erste Kollaps bereits 2.6 s nach dem Schnellschluß auf.

Mit Hilfe der Nadelsonden konnte direkt nachgewiesen werden, daß die Ausdehnung der Kavitationsblase durch den Bypass ebenfalls stark zunimmt. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $v_0=2$ m/s ergibt sich ein Bild, wie es bei eingeschalteter Rohrbrücke bei $v_0=4$ m/s beobachtet wurde: Die Kavitationsblase erreicht beim ersten mal die Nadelsonde Nr. 8, danach nimmt die Ausdehnung mit jedem Zyklus ab. Die Sondensignale sind in Bild 6.14 dargestellt. Als Vergleich betrachte man das Bild 6.2, in dem die Ergebnisse mit Rohrbrücke bei 4 m/s gezeigt werden.

Mit wachsender Anfangsgeschwindigkeit nimmt die Ausdehnung der Kavitationsblase und die Zeitdauer bis zum ersten Kavitationsschlag weiter zu. In Bild 6.15 sind die Dampfgehaltsverläufe für die verschiedenen realisierten Anfangsgeschwindigkeiten (2 - 6 m/s) gegenübergestellt. In Analogie zu den Versuchen mit Rohrbrücke (vgl. Bild 6.9), verschiebt sich der Zeitpunkt des ersten Kollapses, der den intensivsten Kavitationsschlag verursacht, mit wachsender Anfangsgeschwindigkeit zu größeren Zeiten hin.

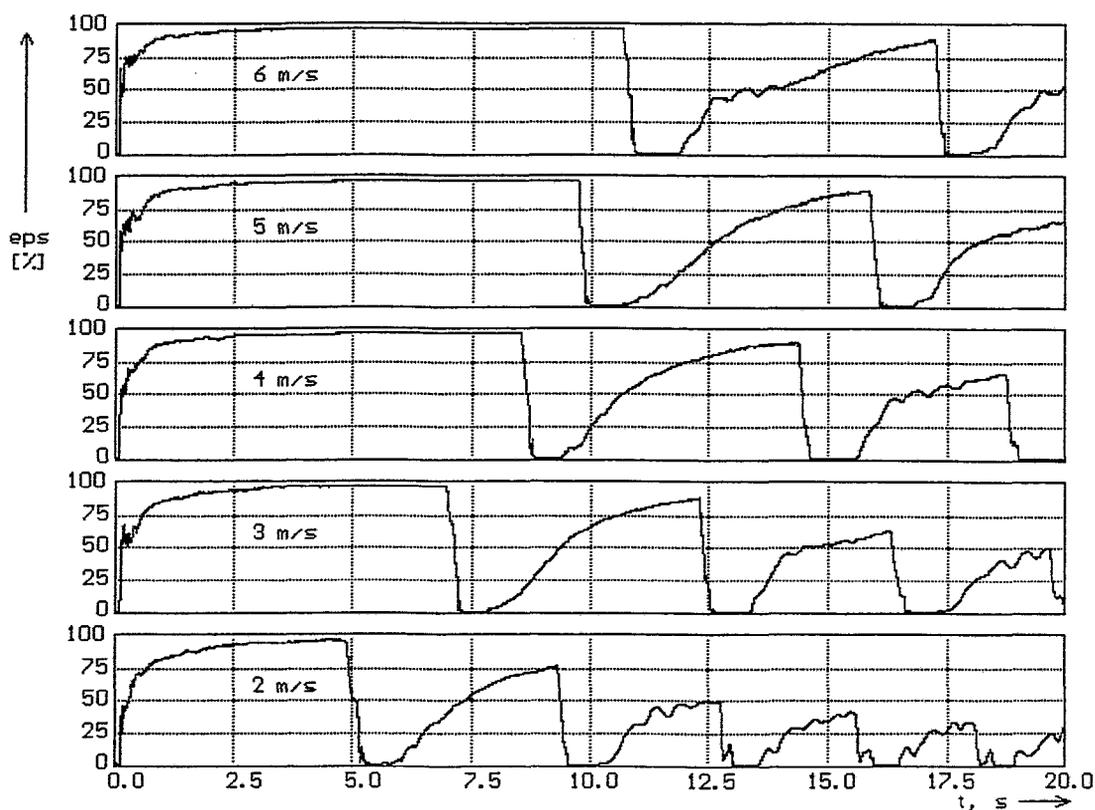


Bild 6.15 Dampfgehalt 0.15 m hinter der Klappe bei verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten, Versuchstyp A-3 (Bypass Rohrbrücke)

6.2.3 Klappe am Ende der Rohrleitung DN100

Bei den Versuchen diesen Typs (A-4) befand sich die Klappe in der Rückleitung der Schleife nur 15.5 m vor dem Reservoir. Durch die geringe Länge der Flüssigkeitssäule in der verbleibenden Rohrleitung sind die Zeiten zwischen Schnellschluß und erstem Kavitationsschlag hier wesentlich geringer, als bei den Versuchen mit Klappe im Vorlauf. In Bild 6.16 sind die Meßergebnisse des Gittersensors zusammengefaßt. Qualitativ laufen die Vorgänge im wesentlichen genau so ab, wie bei den Versuchen mit Klappe im Vorlauf.

6.2.4 Ausdehnung und Lebensdauer der ersten Kavitationsblase

Wie aus den experimentellen Ergebnissen zu erkennen ist, existiert eine starke Abhängigkeit der Zeit, die zwischen Schnellschluß und erstem Kavitationsschlag vergeht, von der anfänglichen Strömungsgeschwindigkeit und von der Länge der Rohrleitung von der Klappe bis zum Reservoir. Für die Berechnung dieser Zeit, die im weiteren als Lebensdauer der Kavitationsblase Δt_K bezeichnet wird, kann ein einfaches Modell für Bewegung der Flüssigkeitssäule aufgestellt werden. Dazu wird davon ausgegangen, daß die Kavitationsblase den Rohrleitungsquerschnitt vollständig ausfüllt und die Flüssigkeit sich wie ein zylinderförmiger starrer Körper bewegt. Unter Berücksichtigung des Sättigungsdrucks in der Kavitationsblase p_S , des Gegendrucks am Rohrleitungsende p_G , der Rohrleitungslänge L , des Gesamtdruckverlustes Δp_{ges} sowie die Dichte der Flüssigkeit ρ_w gilt für die Strömungsgeschwindigkeit v näherungsweise die folgende Differentialgleichung:

$$\rho_w \cdot L \cdot \frac{dv}{dt} = p_S - p_G - \Delta p_{ges} \quad (6.1)$$

Die räumliche Ausdehnung x_K der Kavitationsblase erhält man durch Integration der Geschwindigkeit:

$$x_K = \int_0^t v \cdot dt \quad (6.2)$$

Die Anfangsbedingungen bei $t=0$ sind $v=v_0$ sowie $x_K=0$. Da die Differentialgleichung (6.1) den Beschleunigungsdruckverlust bereits auf der linken Seite berücksichtigt, enthält der Gesamtdruckverlust Δp_{ges} nur die Komponenten Reibungsdruckverlust

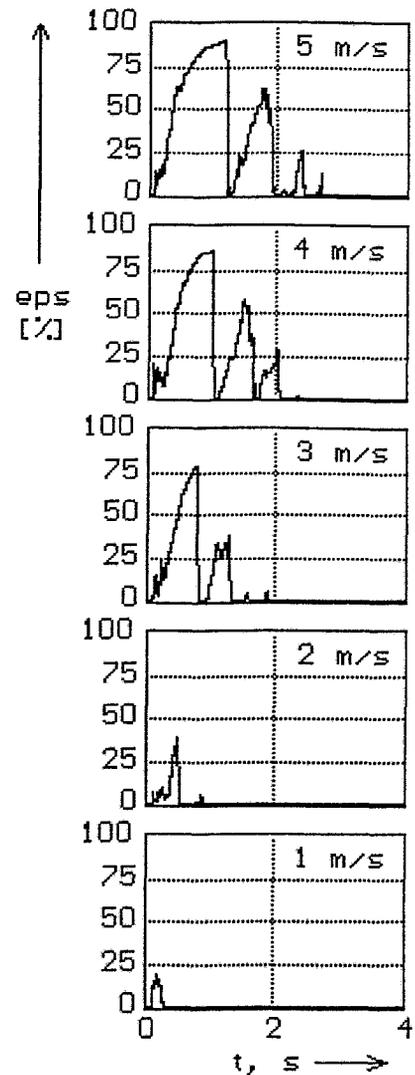


Bild 6.16 Dampfgehalt 0.15 m hinter der Klappe bei verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten, Versuchstyp A-4 (Klappe im Rücklauf)

und hydrostatischer Druckverlust. Der hydrostatische Druckverlust tritt nur dann in Erscheinung, wenn zwischen Reservoir und schnellschließender Klappe ein Niveauunterschied Δh besteht:

$$\Delta p_{\text{ges}} = \left(\zeta_{\text{Rohr}} \cdot \frac{L}{D} + \sum \zeta_{\text{lokal}} \right) \cdot \rho_w \cdot \frac{v \cdot |v|}{2} + g \cdot \rho_w \cdot \Delta h \quad (6.3)$$

Betrachten wir zunächst die Experimente ohne Rohrbrücke (A-3). Durch den Einbau des Bypass verläuft fast die gesamte Leitung praktisch waagrecht. Zwar verursacht der Hochpunkt in der Rückleitung hydrostatische Druckdifferenzen, doch kompensieren sich diese auf dem ansteigenden und dem abfallenden Schenkel solange gegenseitig, wie es im Hochpunkt selber nicht zur Dampfbildung kommt. Dies konnte bei den Versuchen erst bei Wiederöffnen der Armatur beobachtet werden, so daß die Herausbildung der ersten Kavitationsblase davon unberührt bleibt. Ein zweiter hydrostatischer Druckverlust entsteht in dem kurzen Anstieg von $h_0=2.3$ m an der Einmündung in den Vorratsbehälter. Bis zur Strömungsumkehr ist der hydrostatische Druckverlust $g \cdot \rho_w \cdot h_0$. Nach erfolgter Umkehr muß die Höhe der Wassersäule durch Integration der Geschwindigkeit wie folgt berechnet werden:

$$\Delta h = h_0 - \int_0^t v \cdot dt \quad (6.4)$$

Wenn Δh dabei den Wert Null unterschreitet, so hat der Füllstand im senkrechten Abschnitt vor dem Vorratsbehälter den unteren Krümmer erreicht und es muß mit $\Delta h=0$ weitergerechnet werden. Als Gegendruck p_G muß bei diesen Versuchen der Atmosphärendruck (1 bar) angesetzt werden.

Beim Versuch mit Rohrbrücke (A-1) findet nach Absperrung der Klappe auf der Rohrbrücke Dampfbildung statt. Dadurch herrscht bereits dort der Sättigungsdruck p_s , der den Gegendruck darstellt. Der Druck in der Kavitationsblase nach der Klappe und auf der Rohrbrücke ist dann gleich und die Abbremsung der Wassersäule geschieht einzig durch die hydrostatische Druckdifferenz im vertikalen Abschnitt der Rohrleitung vor der Rohrbrücke, die 9.5 m hoch ist, d.h. es ist mit $h_0=9.5$ m zu rechnen. Bei den Experimenten mit Klappe im Rücklauf (A-4) herrscht wie bei A-3 Atmosphärendruck am Ende der Leitung und die hydrostatische Druckdifferenz ergibt sich aus der Höhendifferenz der Einmündung in das Reservoir (2.3 m).

Die Differentialgleichungen (6.1) und (6.2) wurde unter Berücksichtigung der genannten Druckverluste numerisch gelöst. Die Rechnung wurde in dem Moment abgebrochen, in dem die Ausdehnung der Kavitationsblase wieder $x=0$ erreicht. Der dazugehörige Wert der Zeitvariablen ist gleich der gesuchten Lebensdauer der Kavitationsblase Δt_K . Die folgende Tabelle faßt die Parameter für die Berechnungen zusammen:

Tabelle 6.2 Zusammenstellung der Parameter für die Berechnung der Ausdehnung der Kavitationsblase für die verschiedenen Versuchstypen

Parameter		A-1	A-3	A-4
Rohrleitungsdurchmesser:	D, m	0.106	0.106	0.106
Länge der Leitung hinter Klappe:	L, m	43.7	193.3	15.7
Höhe des vert. Abschnitts:	h_0, m	9.5	2.3	2.3
Gegendruck:	p_G, bar	0.023	1	1
Sättigungsdruck:	p_s, bar	0.023	0.023	0.023
Koeff. für lokale Druckverluste:	$\zeta_{\text{lokal}}, 1$	1×0.1	4×0.1	2×0.1
Druckverlustbeiwert:	$\zeta_{\text{Rohr}}, 1$	0.02	0.02	0.02
Dichte:	$\rho_w, kg/m^3$	1000	1000	1000

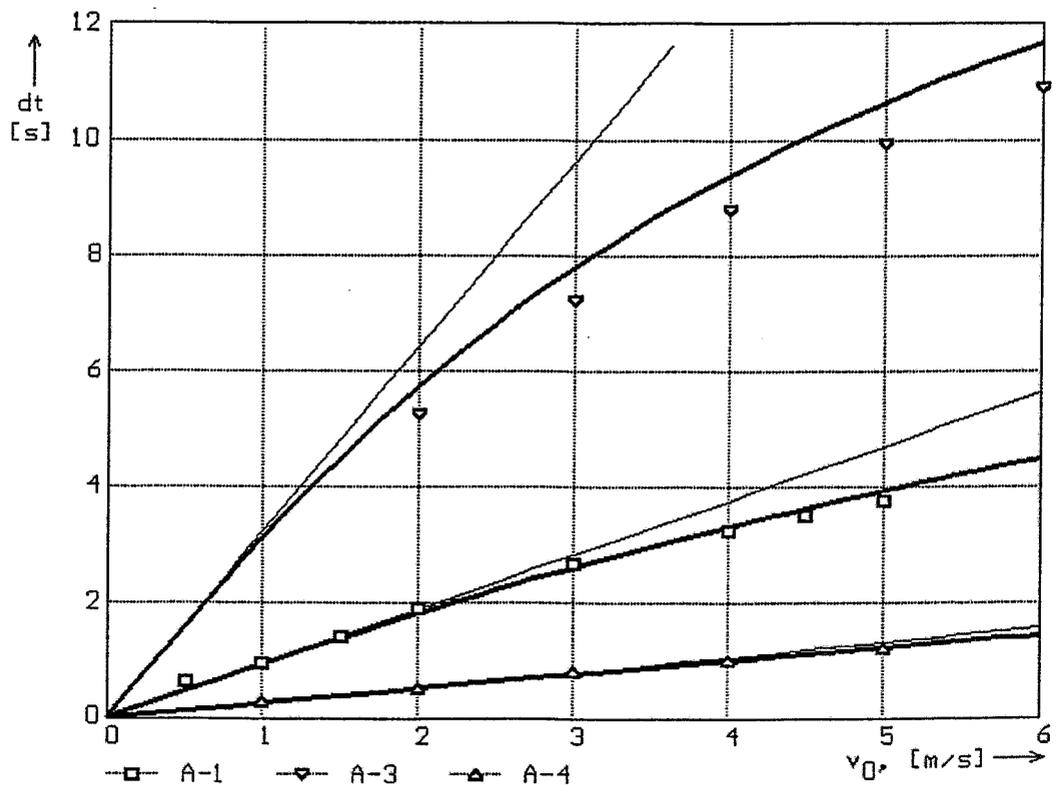


Bild 6.17 Zeitpunkt des ersten Kavitationsschlages in Abhängigkeit von der Anfangsgeschwindigkeit der Flüssigkeit

- A-1 Klappe im Vorlauf, Anlage mit Rohrbrücke
- A-3 Klappe im Vorlauf, Bypass, Anlage ohne Rohrbrücke
- A-4 Klappe im Rücklauf
- dicke Linien: Modell mit Reibungsterm
- dünne Linien: Reibung vernachlässigt
- Punkte: Experiment

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Bild 6.17 dargestellt. Hierbei wurde die Anfangsgeschwindigkeit v_0 variiert. Bei Vernachlässigung der Reibungsdruckverluste ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Zeit und der Anfangsgeschwindigkeit. In die Graphik wurden die experimentellen Werte, die mit Hilfe der Gittersensordaten erhalten wurden, als Punkte eingetragen. Es zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Modell, das die Reibung berücksichtigt. Die Rechnungen ohne Reibungsdruckverluste liefern zu hohe Zeiten, d.h. die Rohrreibung sowie die lokalen Druckverluste an den Krümmern verringern die Zeit zwischen Schließen der Klappe und erstem Druckstoß. Aus der guten Übereinstimmung mit den Experimenten kann abgeleitet werden, daß das beschriebene Modell den Kavitationsvorgang gut beschreibt.

Mit Hilfe des gleichen Modells kann der zeitliche Verlauf der Ausdehnung der Kavitationsblase berechnet werden. Diese Verläufe können anhand der Signale der nadel förmigen Leitfähigkeitssonden verifiziert werden. Bild 6.18 zeigt hierzu einen Versuch ohne Rohrbrücke (A-3) mit $v_0 = 2$ m/s. Die Sondensignale sind in die graphische Darstellung als waagerechte Balken eingetragen, deren Achse sich genau auf der x-Koordinate befindet, die mit der jeweiligen Sondenposition übereinstimmt. Die Breite des Balkens entspricht dabei dem lokalen momentanen Gasgehalt an der Sondenposition.

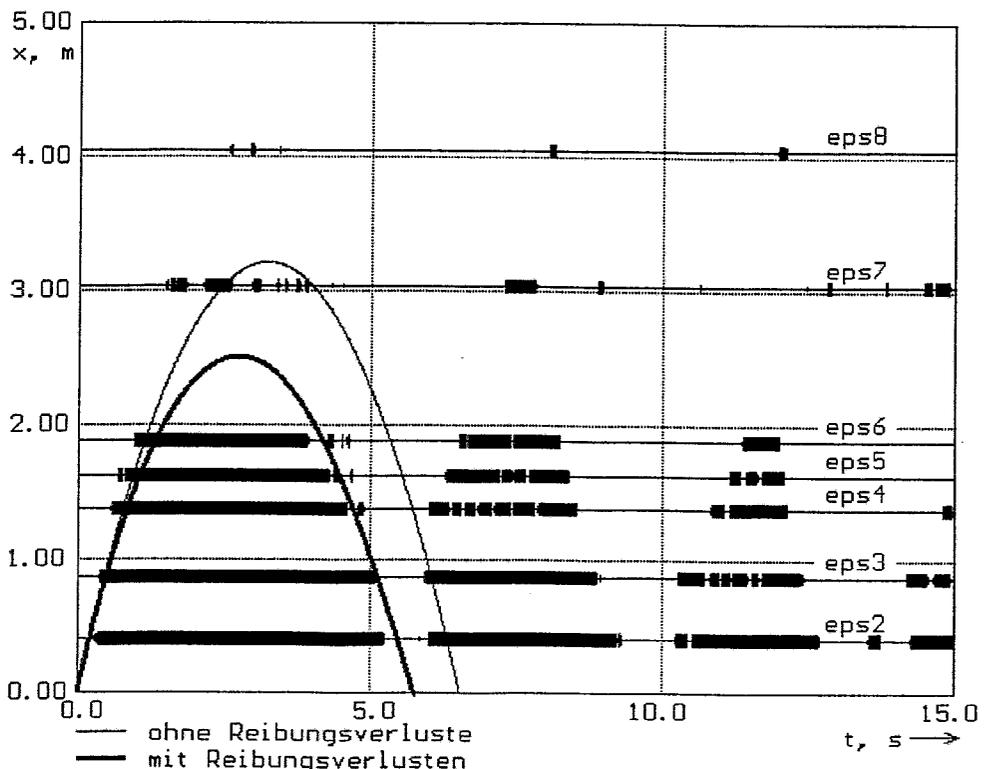


Bild 6.18 Axiale Ausbreitung der Kavitationsblase als Funktion der Zeit bei $v_0 = 2$ m/s (Versuch 66cbm28)

eps2 - eps8: Nadelsondensignale, Dicke der Balken - Dampfgehalt
vertikale Lage der Balken - x-Position

Man erkennt deutlich, daß die unter Berücksichtigung der Reibungsdruckverluste berechnete Kurve (dick) gut mit den Sondensignalen übereinstimmt. Die weiter hinten liegenden Sonden registrieren jedoch tendenziell das Auftreten der Dampfphase etwas früher, als es die Theorie vorhersagt. Insgesamt breitet sich die Kavitationsblase weiter in Strömungsrichtung aus, als es die Theorie vorhersagt.

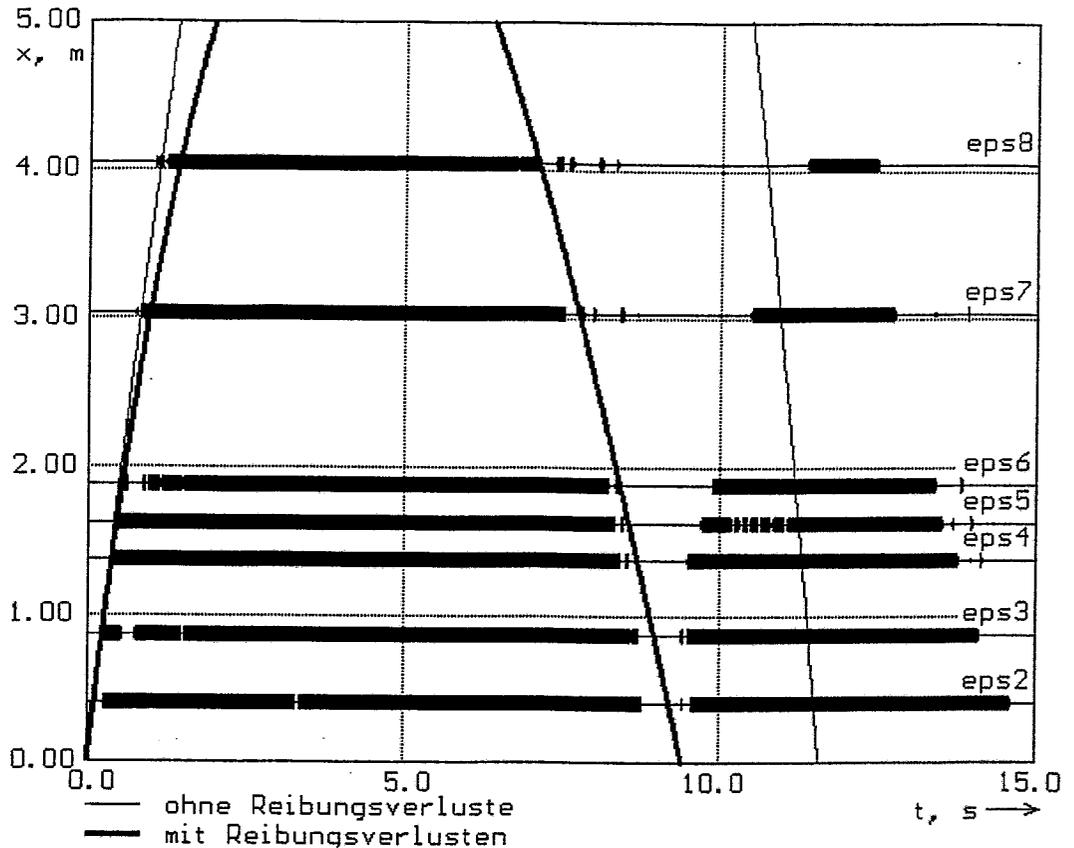


Bild 6.19 Axiale Ausbreitung der Kavitationsblase als Funktion der Zeit bei $v_0=4$ m/s (Versuch 132cbm24)

eps2 - eps8: Nadelsondensignale, Dicke der Balken - Dampfgehalt
vertikale Lage der Balken - x-Position

Diese Abweichung wird dadurch hervorgerufen, daß die Kavitationsblase keine ideale Kolbenform aufweist. Wie die mit dem Gittersensor gemessenen Verteilungen des Dampfes in der Seitenansicht der Rohrleitung gezeigt haben (vgl. Bilder 6.6 und 6.7), liegt am Boden eine Flüssigkeitsschicht vor, deren Höhe mit wachsendem Abstand von der geschlossenen Klappe zunimmt. Die Größe des gebildeten Dampf-volumen wird jedoch im wesentlichen von der Trägheit der Flüssigkeitssäule bestimmt. Deshalb breitet sich die Kavitationsblase am Scheitel der Rohrleitung, wo sich die Nadelsonden befinden, weiter in x-Richtung aus, wodurch das am Boden durch Flüssigkeit versperrte Volumen ausgeglichen wird. Durch die noch während des Anwachsens der Blase ablaufende Herausbildung der Schichtung breitet sich der Dampf am Scheitel der Rohrleitung außerdem etwas schneller aus, als es unter Annahme einer idealisierten kolbenförmigen Blase berechnet wird.

In Bild 6.19 ist ein weiteres Ergebnis dargestellt, das für eine Anfangsgeschwindigkeit von $v_0 = 4$ m/s erhalten wurde. Auch hier ist die Übereinstimmung zwischen der berechneten Ausbreitung mit dem Experiment bei Berücksichtigung der Reibungsdruckverluste gut. Leider war die maximale Ausdehnung der Kavitationsblase wesentlich größer, als der Abstand der letzten verfügbaren Sonde von der Klappe, so daß die Blase weit über die letzte Sondenposition (eps8) hinaus ging.

Sowohl in Bild 6.18 als auch in Bild 6.19 ist zu erkennen, daß die zweite Kavitationsblase, die nach Reflexion der Druckwelle entsteht, unregelmäßiger ausgeprägt ist, als die erste. Es häufen sich auch einzelne kürzere Blasensignale, die von ausgegaster Luft herrühren. Der Versuch wurde später mit einer anderen Anordnung der Nadelsonden wiederholt. Das Ergebnis ist in Bild 6.20 gezeigt. Die Nadelsonden können nunmehr die Blase in ihrer vollen Länge erfassen. Die durch Ausgasen gebildeten Luftblasen treten insbesondere bei den weiter von der Klappe entfernt liegenden Sonden deutlich hervor:

Nachträglich sei zu den Nadelsondensignalen noch bemerkt, daß der gemessene lokale Dampfgehalt 100 % erreicht, wenn die Kavitationsblase bei der jeweiligen Sonde eintrifft. Der in der Rohrleitung vorherrschende mittlere Dampfgehalt ist je-

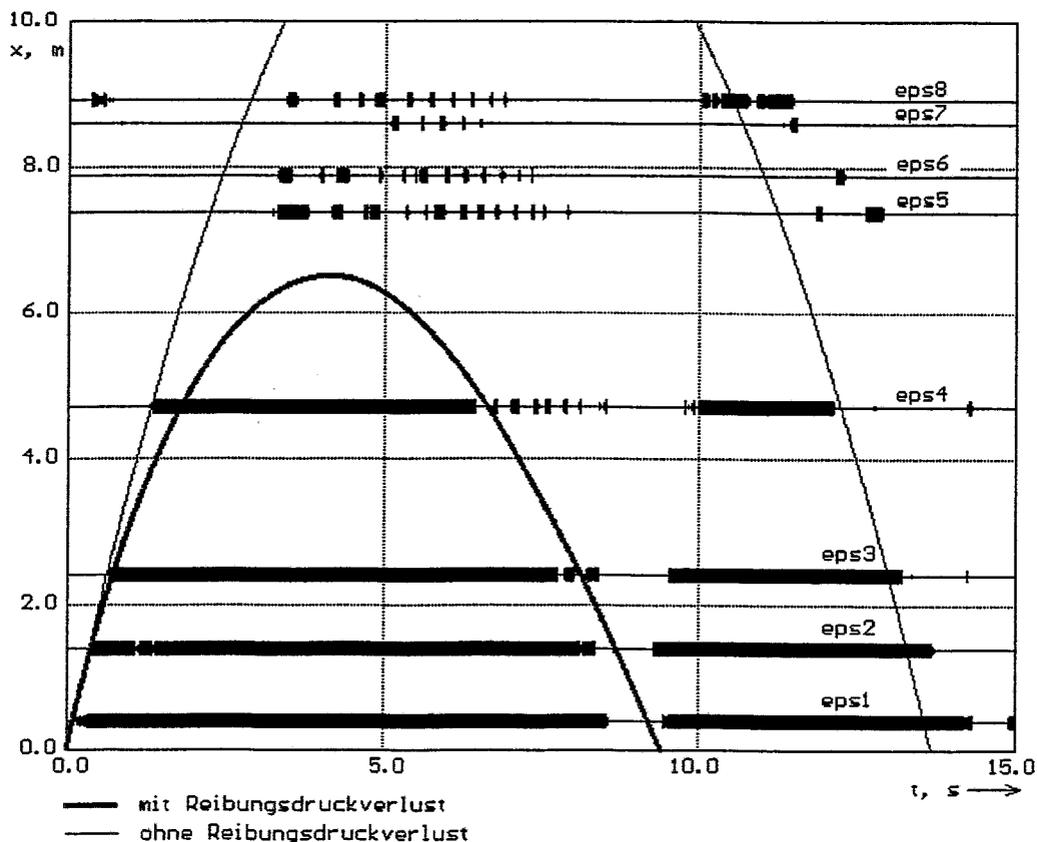


Bild 6.20 Axiale Ausbreitung der Kavitationsblase als Funktion der Zeit bei $v_0 = 4$ m/s (Versuch 132cbm62), veränderte Sondenanordnung
 eps1 - eps8: Nadelsondensignale, Dicke der Balken - Dampfgehalt
 vertikale Lage der Balken - x-Position

doch niedriger, da sich am Boden des Rohrs stets Wasser befindet. Die Nadelsonden liefern lokale Dampf- bzw. Gasanteile genau an dem Ort, wo sich ihre Spitze befindet, also 10 mm unterhalb des Scheitels der Rohrleitung.

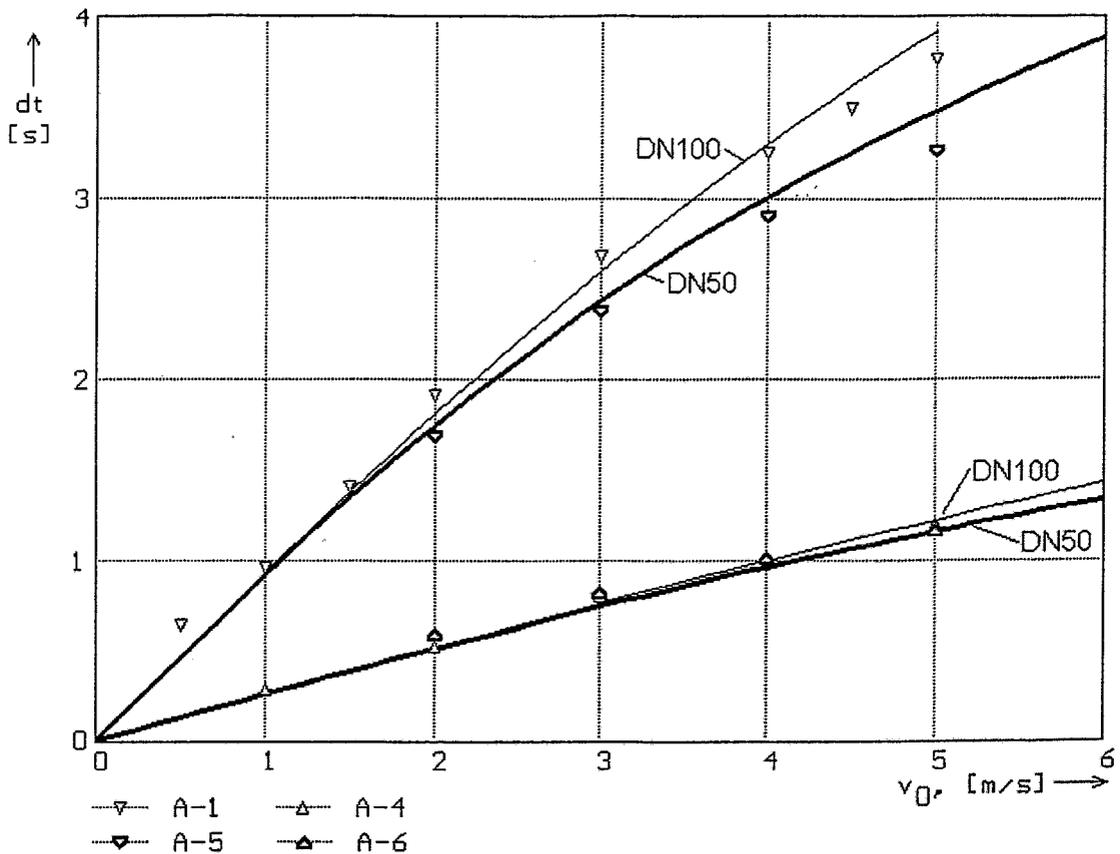


Bild 6.21 Einfluß des Rohrleitungsdurchmessers auf den Zeitpunkt des ersten Kavitationsschlages

- A-1 Klappe im Vorlauf, Anlage mit Rohrbrücke, DN100
- A-4 Klappe im Rücklauf, DN100
- A-5 Klappe im Vorlauf, Anlage mit Rohrbrücke, DN50
- A-6 Klappe im Rücklauf, DN50
- Punkte: Experiment

Der Einfluß des Rohrleitungsdurchmessers konnte dank der Versuche an der Leitung DN50 ebenfalls untersucht werden. Wie sich zeigt, führt der höhere Reibungsdruckverlust in der kleineren Leitung bei ansonsten gleichen Bedingungen zu einer Verringerung der Zeit bis zum ersten Kavitationsschlag. In Bild 6.21 sind die Ergebnisse für DN50 und DN100 gegenübergestellt. Versuche ohne Rohrbrücke wurden bei DN50 nicht durchgeführt. Es können die Versuche des Typs A-1 mit denen vom Typ A-5 und die vom Typ A-4 mit denen vom Typ A-6 verglichen werden.

In Bild 6.22 ist die Abhängigkeit der maximalen theoretischen Ausdehnung der Kavitationsblase von der Anfangsgeschwindigkeit v_0 gezeigt. Sie ist stark von der Länge der Rohrleitung abhängig. Die größte Kavitationsblase tritt bei Versuchstyp A-3

auf, wenn die Rohrbrücke durch den Bypass ersetzt wird. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 6 m/s erreicht die Kavitationsblase eine Länge von 10 m, wobei die tatsächliche Ausdehnung wegen der Abweichung von der idealisierten Kolbenform noch größer ist (vgl. Bilder 6.18 - 6.20).

Eine wichtige Größe ist der Betrag der Flüssigkeitgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Auftreffens der Flüssigkeitssäule v_1 auf die geschlossene Klappe. Dieser Wert läßt sich ebenfalls mit Hilfe des Modells bestimmen, indem der Betrag des Momentanwerts der Geschwindigkeit v ausgegeben wird, der vorliegt, wenn $x=0$ wird. Er bestimmt die Höhe der durch den Kavitationsschlag verursachten Druckspitze. Nach Joukovski ist die Höhe des Drucks proportional zur Geschwindigkeit v_1 , der Dichte ρ_w und der Schallgeschwindigkeit a :

$$\Delta p_{\max} = \rho_w \cdot v_1 \cdot a$$

Die berechneten Geschwindigkeiten sind für die verschiedenen Konfigurationen der Versuchsanlage in Abhängigkeit von der Anfangsgeschwindigkeit v_0 in Bild 6.23 dargestellt. Wie sich zeigt, ist die Endgeschwindigkeit zu-

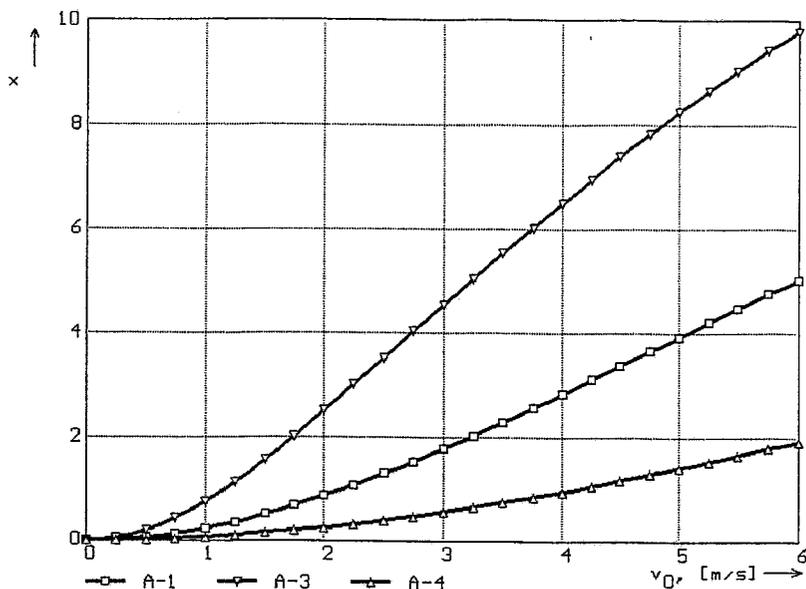


Bild 6.22

Abhängigkeit der maximalen theoretischen Ausdehnung der Kavitationsblase von der Anfangsgeschwindigkeit v_0 (DN100)

- A-1 Klappe im Vorlauf, Anlage mit Rohrbrücke
- A-3 Klappe im Vorlauf, Bypass, Anlage ohne Rohrbrücke
- A-4 Klappe im Rücklauf

nächst annähernd gleich der Anfangsgeschwindigkeit. Durch die Wirkung der Druckverluste wird jedoch zunehmend Energie dissipiert, so daß der Anstieg der Kurven kleiner wird. Je länger die Rohrleitung ist, um so größer ist der Reibungseinfluß und um so geringer ist folglich die Endgeschwindigkeit. Der Einfluß des Rohrleitungsdurchmessers ist ebenfalls gut zu erkennen. Die Endgeschwindigkeit und damit auch die Höhe der Druckstöße wird mit abnehmendem Durchmesser geringer.

Bei großer Rohrleitungslänge, d.h. bei den Experimenten ohne Rohrbrücke (A-3), tritt ab einer Anfangsgeschwindigkeit von ca. 3 m/s kaum noch eine Zunahme der Endgeschwindigkeit auf. Das deckt sich mit der Beobachtung, daß die Druckstöße bei den Kavitationsschlägen ab 3 m/s ebenfalls nicht mehr wesentlich ansteigen.

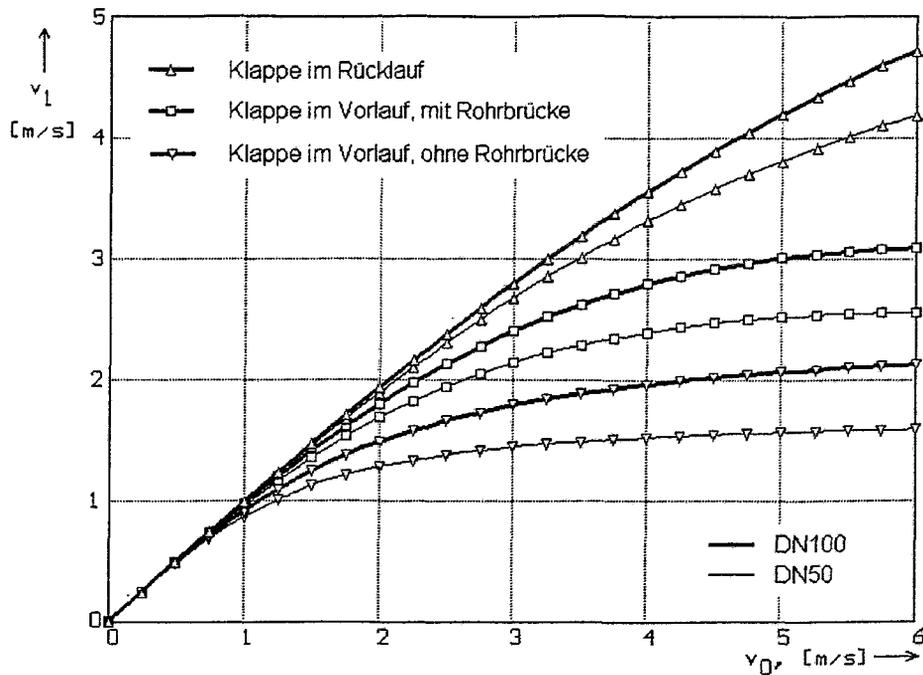


Bild 6.23 Abhängigkeit der Endgeschwindigkeit beim Auftreffen des Flüssigkeitsschwall v_1 auf die geschlossene Klappe von der Anfangsgeschwindigkeit v_0

Die Kavitationsblase hat bereits eine so große Ausdehnung erreicht, daß sich bei der Beschleunigung der Flüssigkeitssäule in Richtung auf die geschlossene Klappe ein Gleichgewicht zwischen der treibenden Druckdifferenz und den Druckverlusten einstellen kann. Die Flüssigkeitssäule kann letztlich nur bis zu derjenigen Geschwindigkeit beschleunigt werden, bei der die Druckverluste und die treibende Druckdifferenz sich die Waage halten. Den Maximalwert für die Geschwindigkeit erhält man, indem man in Gl. (6.1) $dv/dt=0$ setzt und diese zusammen mit Gl. (6.3) nach v umstellt. Dabei muß während der Beschleunigungsphase das negative Vorzeichen von v berücksichtigt werden, d.h. man erhält

$$v_{1,\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_G - p_S + g \cdot \rho_W \cdot \Delta h)}{\left(\zeta_{\text{Rohr}} \cdot \frac{L}{D} + \sum \zeta_{\text{lokal}} \right) \cdot \rho_W}} \quad (6.6)$$

Für den Fall Klappe im Vorlauf ohne Rohrbrücke (A-3) erhält man für DN100 eine Maximalgeschwindigkeit von $v_{1,\max}=2.3$ m/s. Hierbei wurde unterstellt, daß der vertikale Schenkel von 2.3 m Höhe während der Rückströmung leer läuft und danach keine Wirkung mehr hat ($\Delta h=0$). Für die DN50 ergibt Gl. (6.6) $v_{1,\max}=1.65$ m/s. Beides stimmt gut mit dem asymptotischen Verhalten der numerischen Ergebnisse in Bild 6.23 überein.

6.3 Kavitation in unmittelbarer Umgebung der schnellschließenden Klappe

6.3.1 Klappe im Vorlauf der Leitung DN50

An der Rohrleitung DN50 ergab sich die Gelegenheit, zwei Gittersensoren mit jeweils 2 x 8 Elektroden unmittelbar vor und hinter die schnellschließende Klappe zu flanschen. Die dabei erhaltenen Aufnahmen zeigen die Kavitation direkt während des Schließvorgangs. Die genannte Sensorkombination wurde bei zwei Versuchstypen angewandt: A-5 (exzentrische Klappe im Vorlauf) und A-6 (exzentrische Klappe im Rücklauf). Bei den Versuchen an der Rohrleitung DN50 wurden außerdem die Ultraschallaufnehmer getestet. Nadelsonden wurden nicht eingesetzt.

Die Verläufe des mittleren Dampfgehalts unmittelbar hinter der Klappe ähneln denen, die bei den entsprechenden Versuchen in der Rohrleitung DN100 erhalten wurden (Bild 6.24). Durch den geringeren Durchmesser sind jedoch die Reibungsverluste größer und die Zeitspanne bis zum Auftreten des ersten Kavitationsschlages ist geringer (vgl. Abschnitt 6.2.4).

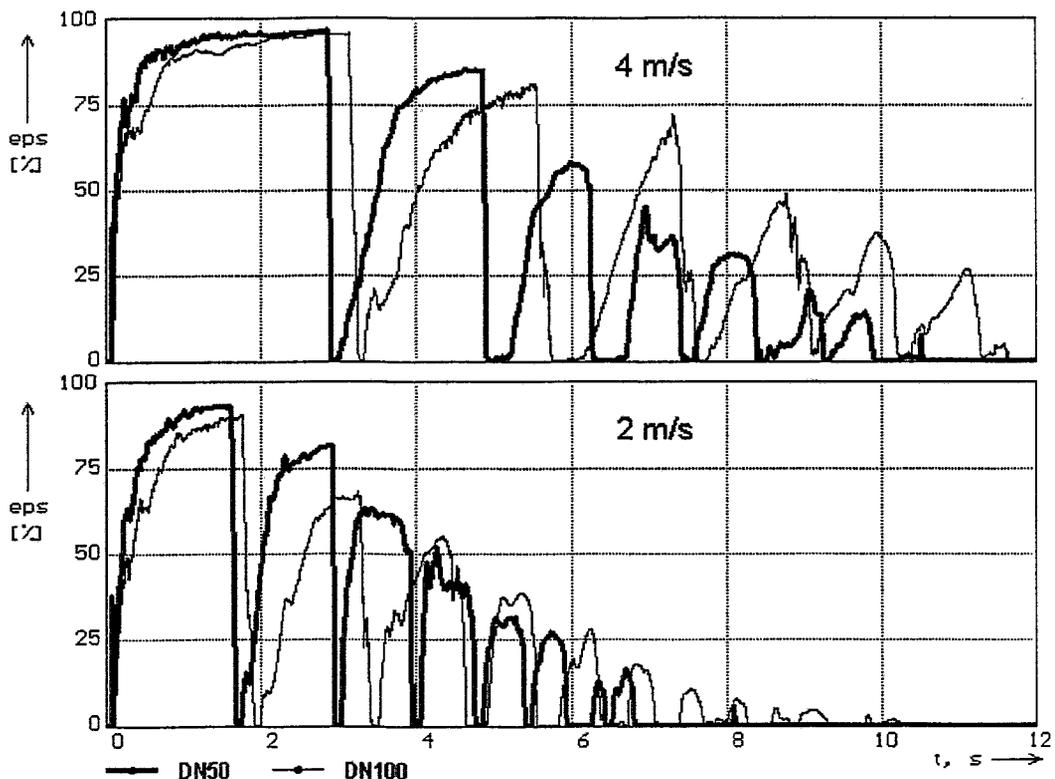


Bild 6.24 Verläufe des mittleren Dampfgehalts unmittelbar hinter der Klappe für ausgewählte Anfangsgeschwindigkeiten, Vergleich DN50 - DN100, Klappe im Vorlauf (A-1 bzw. A-5)

Versuche: 2 m/s, DN100 - 66cbm11, DN50 - 16c01dn5
4 m/s, DN100 - 133cbm07, DN50 - 32c01dn5

Die Gittersensoren befanden sich so dicht vor bzw. hinter der Armatur, daß der äußere Rand des Tellers der Klappe im geöffnetem Zustand nur ca. 6 mm von den Elektrodenstäbchen entfernt war. Der Gittersensor hinter der Klappe war deshalb in der Lage, die Kavitationsblasen, die entstanden, während sich der Teller noch in seiner Drehbewegung befand, zu detektieren. In Bild 6.25 sind hierzu mehrere Einzelbilder der Dampfgehaltsverteilung im Strömungsquerschnitt dargestellt.

Die ersten Dampfblasen treten bei $t=67$ ms auf, d.h. zu einem Zeitpunkt, da die Klappe erst zu ca. 80 % geschlossen ist. Deutlich erkennbar ist auch die Asymmetrie. In der Blickenebene bewegt sich beim Schließvorgang der Teller der Klappe im Bild links vom Betrachter weg und rechts auf den Betrachter zu. Die Strömung ist auf den Betrachter zu gerichtet. Es ist in mehreren Fällen zu beobachten, daß Dampfblasen innerhalb weniger Millisekunden durch Kondensation wieder verschwinden, wie z.B. die Blase links unten zwischen $t=71$ ms und 73 ms. Bei diesen Vorgängen handelt es sich um Kavitation unmittelbar an der Klappe.

Erst bei $t=100$ ms ist die Klappe vollständig geschlossen. Danach setzt der Stratifikationsvorgang ein, wie er auch bei den Versuchen an der Rohrleitung DN100 beobachtet worden ist. Er führt zur Herausbildung einer Flüssigkeitsschicht am Boden der Rohrleitung. Diese Schichtung ist bei $t=200$ ms bereits gut zu erkennen.

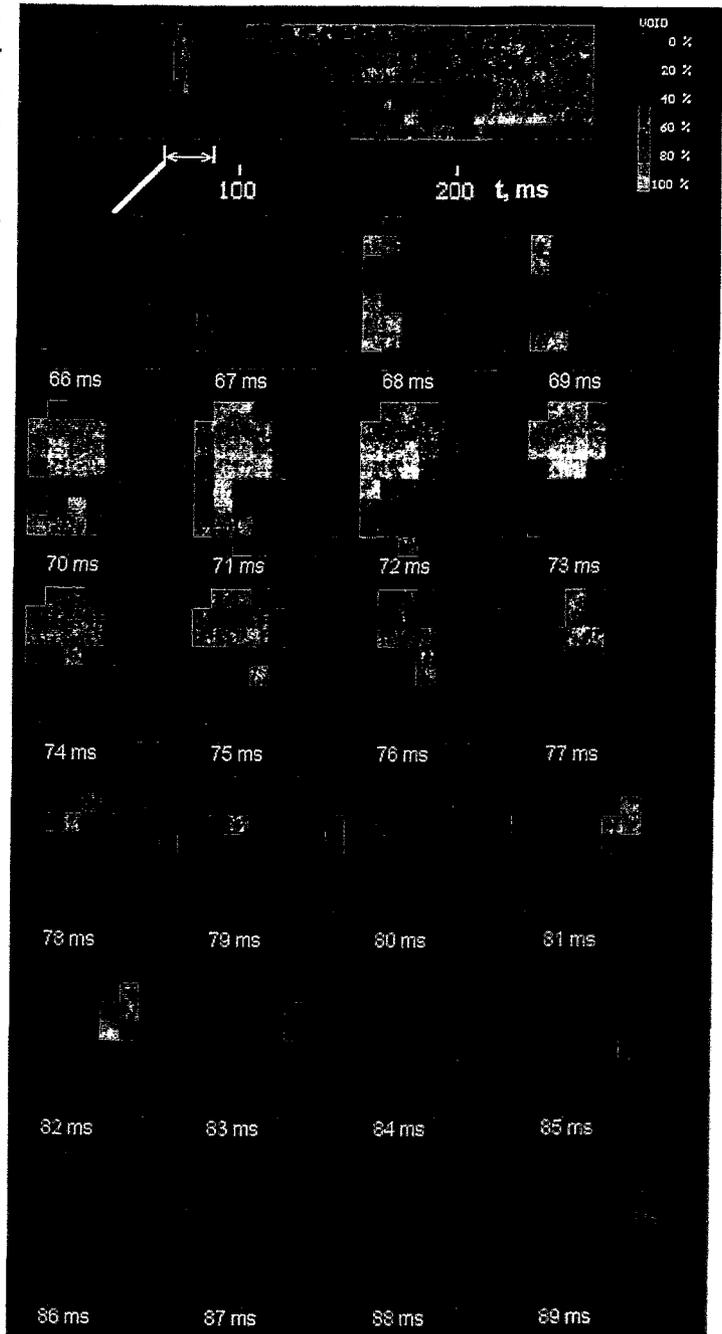


Bild 6.25 Sequenz von Dampfgehaltsverteilungen hinter der Klappe in der Rohrleitung DN50 bei $v_0=4$ m/s während des Schließvorgangs (Versuch 32c01dn5)

Der weitere Kavitationsvorgang verläuft weitgehend genau so, wie bei den Versuchen mit der Rohrleitung DN100. Zur Illustration zeigt Bild 6.26 den Zeitverlauf der axialen Dampfgehaltsverteilungen während der ersten zwei Kavitationszyklen bei einer Anfangsgeschwindigkeit von $v_0 = 4$ m/s.

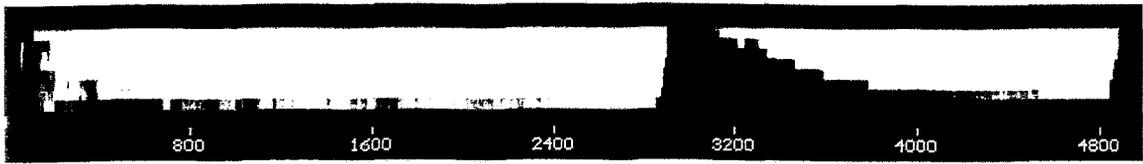


Bild 6.26 Zeitverlauf der axialen Dampfgehaltsverteilungen während der ersten zwei Kavitationszyklen, $v_0=4$ m/s, Versuch 32c01dn5

Achse: Zeit in ms

Bei den Experimenten mit Klappe im Vorlauf (A-5) hat der vor der Klappe angeordnete Gittersensor bei keiner der betrachteten Strömungsgeschwindigkeiten Dampfblasen detektiert. Das steht in gewissem Widerspruch zu den Druckverläufen, die am Meßpunkt p01 nach dem anfänglichen Druckstoß die Abnahme des Drucks auf den Sättigungswert nachwiesen. Die Zustände mit Sättigungsdruck lagen über mehrere 10 ms an, so daß die Zeitauflösung des Gittersensors nicht die Ursache für die nicht erfolgte Detektion von Dampf sein kann. Es muß davon ausgegangen werden, daß entweder die Dampfbildung durch Siedeverzug weitgehend verzögert wurde oder nur an der unmittelbaren Oberfläche des Ventiltellers kleinere Dampfblasen aufgetreten sind, die trotz des geringen Abstands zum Gittersensor diesen nicht erreicht haben.

6.3.2 Klappe im Rücklauf der Leitung DN50

Wenn sich die Klappe im Rücklauf befindet (A-6), sind die Zeitabschnitte, in denen vor der Klappe Sättigungsdruck auftritt, wesentlich länger, als bei der Klappe im Vorlauf. Bei den entsprechenden Versuchen wurden deshalb Dampfblasen auf beiden Seiten der Klappe nachgewiesen. Die Zeitverläufe der axialen Dampfgehaltsverteilungen sind für verschiedene Anfangsgeschwindigkeiten in Bild 6.27 dargestellt. Während erwartungsgemäß die Lebensdauer der ersten Kavitationsblase hinter der Klappe mit wachsender Anfangsgeschwindigkeit zunimmt, gehen die Kavitationserscheinungen vor der Klappe tendenziell zurück. Bei $v_0=5$ m/s sind Dampfblasen vor der Klappe nur noch ansatzweise zu beobachten.

Dieser Effekt kann wie folgt erklärt werden: Die Einstellung der Anfangsgeschwindigkeit wird durch Regelung der Pumpendrehzahl bewerkstelligt. Mit wachsender Geschwindigkeit erzeugt die Pumpe dadurch den zur Überwindung der Druckverluste in der Leitung erforderlichen, immer höheren Vorlaufdruck. Dieser Vorlaufdruck ist gleichzeitig der Gegendruck, der die sich vor der geschlossenen Klappe bewegende Flüssigkeitssäule abbremst und wieder in Richtung auf die Klappe beschleunigt. Die auftretenden Kavitationsblasen werden dadurch mit wachsender Anfangsgeschwindigkeit immer schneller wieder komprimiert.

Die Verdampfung vor der Klappe setzt jeweils ca. nach 430 - 570 ms ein. Die Laufzeit der Druckwelle von der Klappe bis zum Reservoir am Anfang der Leitung und zurück beträgt etwa 270 ms bei ca. 2 x 200 m Lauflänge und einer Schallgeschwin-

digkeit von ca. 1500 m/s. Zuzüglich der Schließzeit von etwa 100 ms kommt man auf vergleichbare Zeitverzögerungen, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die Verdampfung durch den als Entspannungswelle reflektierten zulaufseitigen Druckstoß hervorgerufen wird.

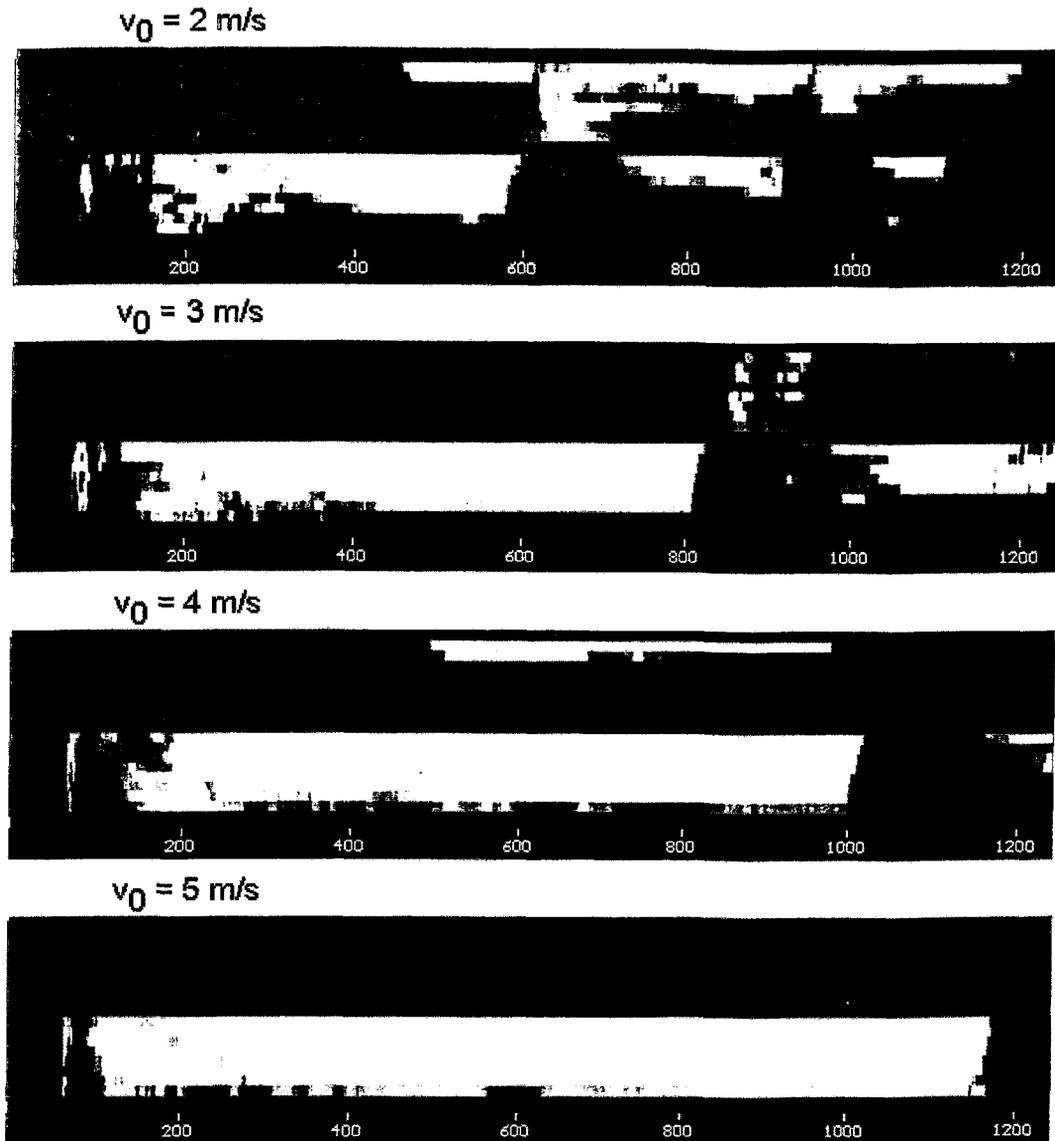


Bild 6.27 Zeitverläufe der axialen Dampfgehaltsverteilungen bei verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten, DN50, Klappe im Rücklauf (A-6)
 oberer Balken - Gittersensor vor der Klappe
 unterer Balken - Gittersensor hinter der Klappe
 Achse: Zeit in ms
 Versuche 16c03dn5, 25c03dn5, 32c03dn5, 42c04dn5

6.4 Zudosierung von Luft

Durch die Zudosierung von Luft in die Rohrleitung wird die Kompressibilität des strömenden Mediums erhöht. Dadurch vermindert sich die Amplitude der Druckstöße.

Bild 6.28 zeigt hierzu Meßergebnisse für eine Anfangsgeschwindigkeit von $v_0 = 5$ m/s. Verglichen werden die Verläufe des mittleren Dampfgehalts und des Drucks hinter der schnellschließenden Klappe. Parameter ist der Volumenstrom-Gasanteil berechnet aus dem Luftvolumenstrom bezogen auf Normalbedingungen. Während beim Referenzfall (Luftzuspeisung 0 %) Kavitationsschläge mit Druckspitzen von ca. 45 bar auftreten, werden schon bei Zuspeisung von 2 % Luft nur noch geringe Druckerhöhungen beobachtet, die unter dem statischen Druck bei laufender Pumpe und geöffneter Armatur liegen. Die typischen Pulsationen des Dampfgehalts hinter der Klappe treten jedoch in abgeschwächter Form weiterhin auf. Durch das Vorhandensein des nichtkondensierbaren Gases sind jedoch insbesondere die Rückflanken der Dampf- bzw. Gasgehaltspulse weniger steil ausgeprägt.

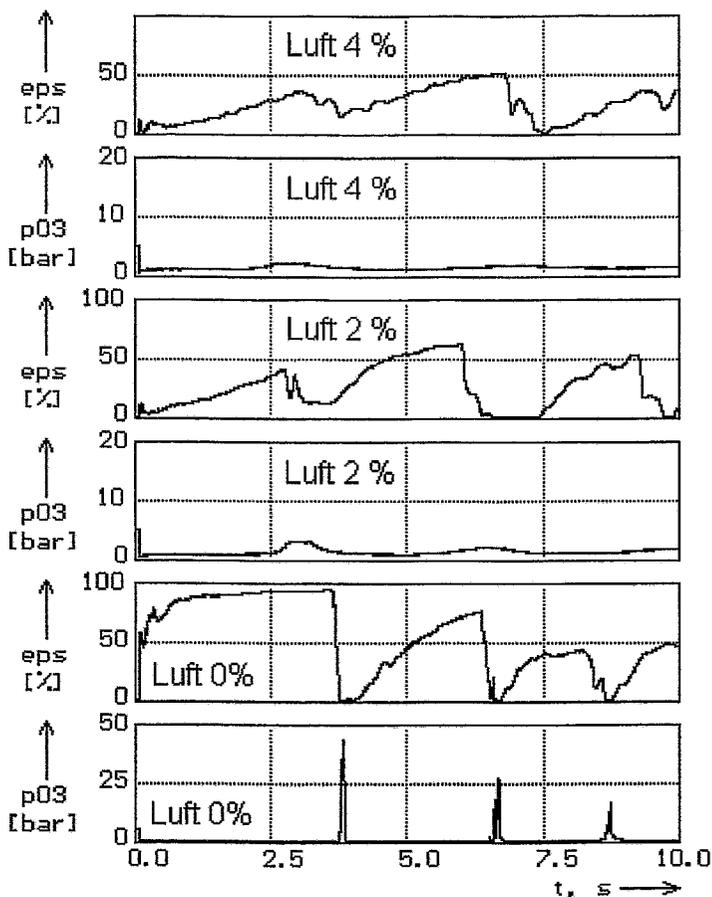


Bild 6.28

Effekt der Zuspeisung von Luft auf die Kavitationsschläge und die Dampf- bzw. Gasgehaltsverläufe hinter der Klappe, $v_0 = 5$ m/s, Versuchstyp B-1

(165cbm02, 165cbm07, 165 cbm10)

Bemerkenswert ist, daß der Druckerhöhung bei 2 % Luftzuspeisung, der dem Kavitationsschlag im Referenzfall am nächsten kommt, nicht zum Absinken des Dampf- bzw. Gasanteils auf null führt, da sich erhebliche Mengen nichtkondensierbaren Gases im Meßquerschnitt befinden.

Der Zeitverlauf der axialen Dampf- bzw. Gasgehaltsverteilung sowie ausgewählte Querschnittsbilder sind für den Fall 2 % Luftzuspeisung in Bild 6.29 dargestellt. Bei $t = 115$ ms ist zu erkennen, daß trotz der Luftzuspeisung die Verdampfung auf der linken Seite zuerst einsetzt, wo sich der Teller der Klappe vom Betrachter weg bewegt (vgl. Bild 6.4). Im weiteren Verlauf stellt sich die bekannte Schichtung ein ($t = 2.73$ s). Bei $t = 2.90$ s erreicht der Druck p_{03} sein Maximum. Im Strömungsquerschnitt ist zu diesem Zeitpunkt noch ein Volumengasgehalt von ca. 20 % anzutreffen.

fen. Dabei handelt es sich um Luft, die durch die Kraft der in Richtung Klappe zurückgeströmten Flüssigkeitssäule komprimiert wurde.

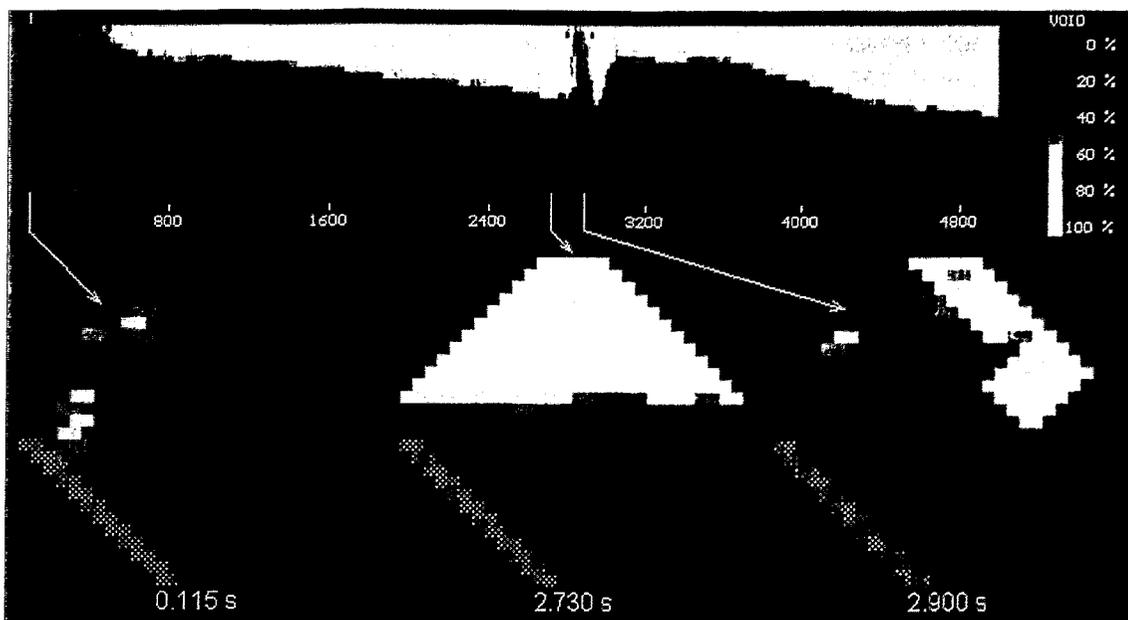


Bild 6.29 Zeitverlauf der axialen Dampf- bzw. Gasverteilung sowie ausgewählte Querschnittsbilder für $v_0=5$ m/s, 2 % Luftzuspeisung, Versuchstyp B-1, Versuch 165cbm07

Der Druck hinter der Klappe fällt bei den Versuchen mit Luftspeisung nicht auf den Sättigungsdruck der Flüssigkeit ab. Bei der Anfangsgeschwindigkeit von $v_0 = 5$ m/s beträgt der Druck p_{03} hinter der Klappe vor deren Schließen ca. 5 bar. Nach dem Schließen werden mit wachsendem Luftanteil steigende Drücke gemessen. Der Druck fällt bei 10 % Luftanteil bereits nur noch auf ca. 1,5 bar ab, bleibt also weit über dem Sättigungsdruck.

Der reale volumetrische Luftanteil in der Rohrleitung muß unter Berücksichtigung dieses Druckes ermittelt werden. Die Prozentangaben in den Bildern 6.28 - 6.30 beziehen sich auf Normalbedingungen, d.h. auf einen Druck von 1 bar. In der Rohr-

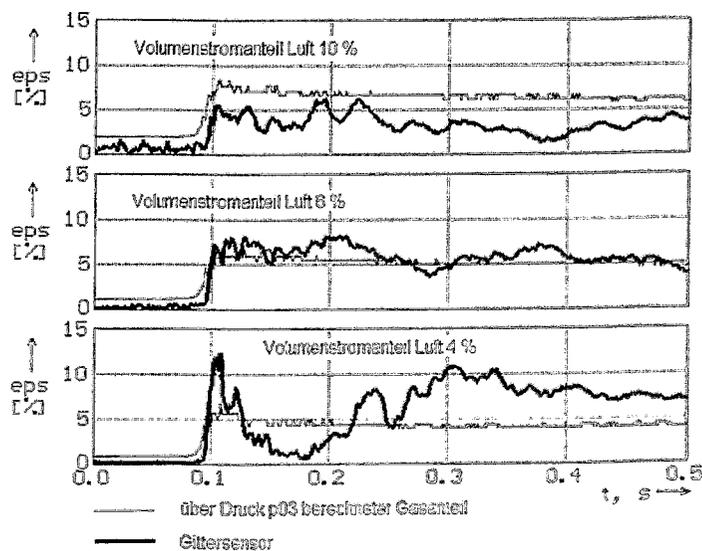


Bild 6.30 Verläufe des mittleren Gasanteils während der ersten 500 ms in Abhängigkeit von der Luftzuspeisung

leitung herrscht vor Schließen der Klappe ein höherer Druck. Unter Vernachlässigung eines Phasenschlupfs und des Temperatureinflusses kann der mittlere volumetrische Gasanteil $\bar{\varepsilon}$ aus dem Volumenstromanteil bei Normalbedingungen $\dot{\varepsilon}_N$ wie folgt berechnet werden:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\dot{\varepsilon}_N}{\rho_{03}} \quad (6.7)$$

Während der ersten 500 ms schreitet die Separation im Strömungsquerschnitt noch nicht weit fort und es liegt noch eine annähernd homogene Gasgehaltsverteilung vor. In den ersten 100 ms liegen noch annähernd die Strömungsverhältnisse vor, die vor dem Schließen der Armatur geherrscht haben, weil der Schließvorgang noch nicht beendet ist. Bild 6.30 zeigt die entsprechenden Ausschnitte aus den Verläufen des mittleren Gasanteils. Im gleichen Bild sind außerdem die nach Gl. (6.7) ermittelten Gasgehalte angegeben. Man erkennt, daß der Gittersensor die Gasgehalte leicht unterbewertet. Insgesamt ist die Übereinstimmung gut, insbesondere der Anstieg nach Beendigung des Schließvorgangs wird richtig wiedergegeben. Er wird durch eine annähernd isotherme Expansion der Luft bei Abfall des Drucks hervorgerufen.

Mit fortschreitender Zeit steigen die Gasanteile schließlich weiter an, wie in Bild 6.28 dargestellt. Das ist bereits auf den Stratifikationsvorgang zurückzuführen, bei dem die Luft sich im vorderen Abschnitt der Rohrleitung unmittelbar hinter der Klappe sammelt, weil die Rohrleitung leicht abwärts geneigt ist. Verdampfung findet nur in geringem Maße statt, da die Sättigungstemperatur nicht erreicht wird.

Mischformen treten bei kleineren Zuspätschreitungen auf. Sie sind für die Abweichungen in Bild 6.30 zwischen Gittersensor und Rechenwert nach Gl. (6.7) bei $\dot{\varepsilon}_N = 4\%$ verantwortlich. In Bild 6.31 sind einige Gasgehaltsverteilungen bei $\dot{\varepsilon}_N = 1\%$ dargestellt, bei denen die typische asymmetrische Kavitation hinter der schnellschließenden Klappe zu erkennen ist.

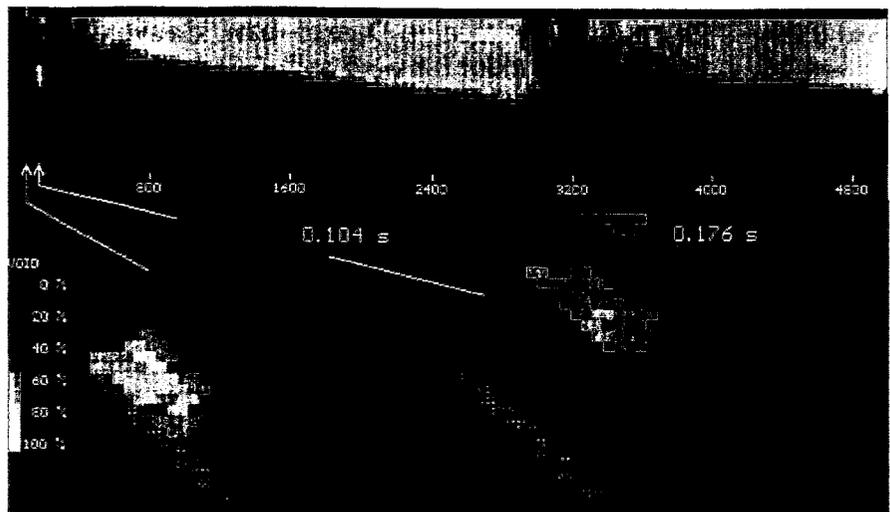


Bild 6.31 Gas- bzw. Dampfgehaltsverteilungen bei $v_0 = 5$ m/s und einem Volumenstromanteil der zugeführten Luft von 1 % (A-5, Versuch 165c04d1)

In Bild 6.31 sind einige Gasgehaltsverteilungen bei $\dot{\varepsilon}_N = 1\%$ dargestellt, bei denen die typische asymmetrische Kavitation hinter der schnellschließenden Klappe zu erkennen ist.

6.5 Verringerung der Schließgeschwindigkeit

In einer speziellen Versuchsserie (C-1) wurde untersucht, welche Auswirkung die Verringerung der Schließgeschwindigkeit auf die Druckstöße vor und nach der schnellschließenden Klappe hat. Die schnellschließende Klappe besitzt einen elektro-pneumatischen Stellungsregler mit pneumatischem Schwenkantrieb. Das Öffnen wird durch Beaufschlagung des Steuerzylinders mit Preßluft erreicht. Der Schließvorgang wird durch Ablassen der Preßluft über eine 1/2" Schnellentlüftung ausgelöst. Die Schließgeschwindigkeit kann durch Drosselung des Luftstroms beim Ablassen vermindert werden. Dazu wurden Drosseln verwendet, deren Durchmesser die Schließgeschwindigkeit bestimmen. Die Stellungsrückmeldung der Klappe lieferte in Abhängigkeit vom Durchmesser der Drossel die in Tabelle 6.3 zusammengestellten Zeitpunkte für das Erreichen eines Öffnungsgrades von 75, 50 und 25 %.

Öffnungs- grad	Drosseldurchmesser		
	keine Drossel	5 mm	3.8 mm
75 %	0.10 s	0.35 s	0.65 s
50 %	0.12 s	0.45 s	0.84 s
25 %	0.15 s	0.50 s	0.94 s

Tabelle 6.3 Wirkung der Drossel auf den Schließvorgang der Klappe

Dazu wurden Drosseln verwendet, deren Durchmesser die Schließgeschwindigkeit bestimmen. Die Stellungsrückmeldung der Klappe lieferte in Abhängigkeit vom Durchmesser der Drossel die in Tabelle 6.3 zusammengestellten Zeitpunkte für das Erreichen eines Öffnungsgrades von 75, 50 und 25 %.

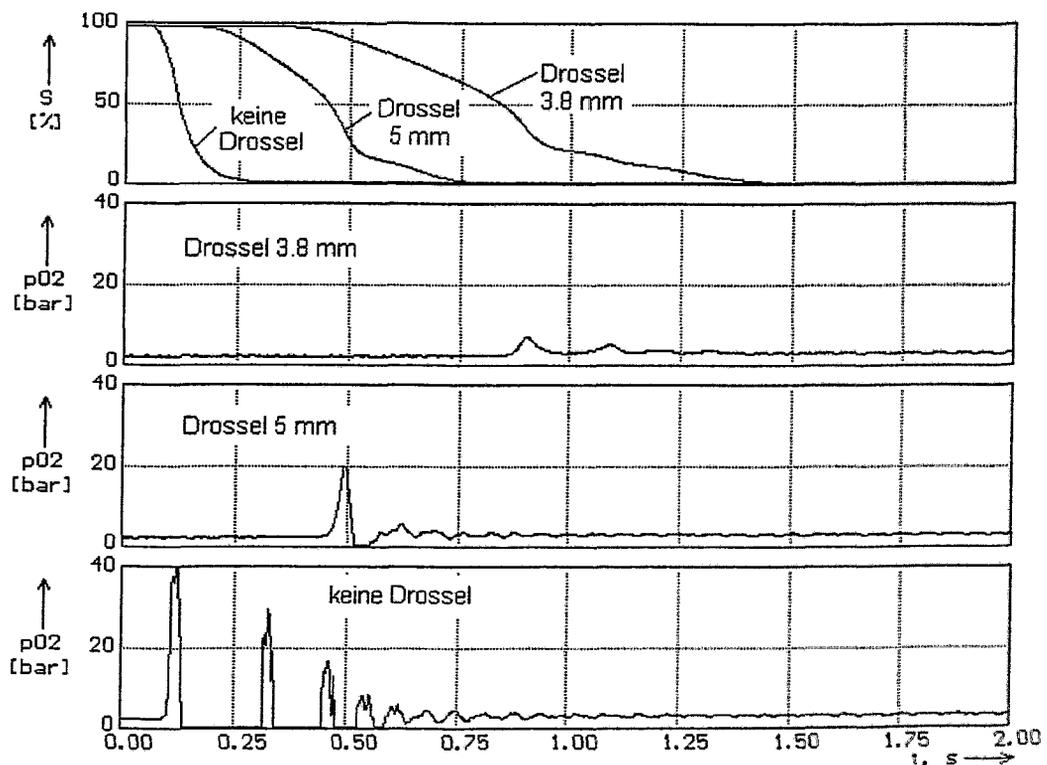


Bild 6.32 Verläufe des Drucks p_{02} vor der schnellschließenden Klappe und des Schließwinkels S bei Verminderung der Schließgeschwindigkeit, $v_0 = 3 \text{ m/s}$, Versuchstyp C-1 (Experimente 99c173d1, 99c183d1, 99c189d1)

Wie aus Bild 6.32 ersichtlich, führt die Verzögerung des Schließvorgangs zu einer starken Abnahme des Druckstoßes vor der Armatur. Bei der Drossel mit 3.8 mm Durchmesser ist nur noch eine maximale Druckspitze von 6.7 bar zu beobachten, während im Referenzexperiment ohne Drossel 40.5 bar auftraten. Die Druckstöße können demzufolge wirkungsvoll bekämpft werden, indem die Schließzeit auf ca. 1 s angehoben wird.

Hinter der Klappe ergibt sich ein anderes Bild. Dort ist die bestimmende Zeitkonstante durch die Abbremsung der Flüssigkeitssäule gegeben. Wie anhand von Bild 6.17 in Abschnitt 6.2.4 zu erkennen ist, erfolgt der Kavitationsschlag bei der Anfangsgeschwindigkeit von $v_0 = 3$ m/s erst nach ca. 2.7 s. Damit ist die Abbremsung der Flüssigkeitssäule bei einer Schließzeit von ca. 1 s noch nicht abgeschlossen und es bildet sich eine Kavitationsblase, die anschließend zu einem Kavitationsschlag führt. Das dabei auftretende Druckmaximum unterscheidet sich vom Referenzfall nur wenig (Bild 6.33). Der Dampfgehaltsverlauf hinter der Klappe bleibt im wesentlichen unverändert. Es findet lediglich eine Verschiebung zu höheren Zeiten statt.

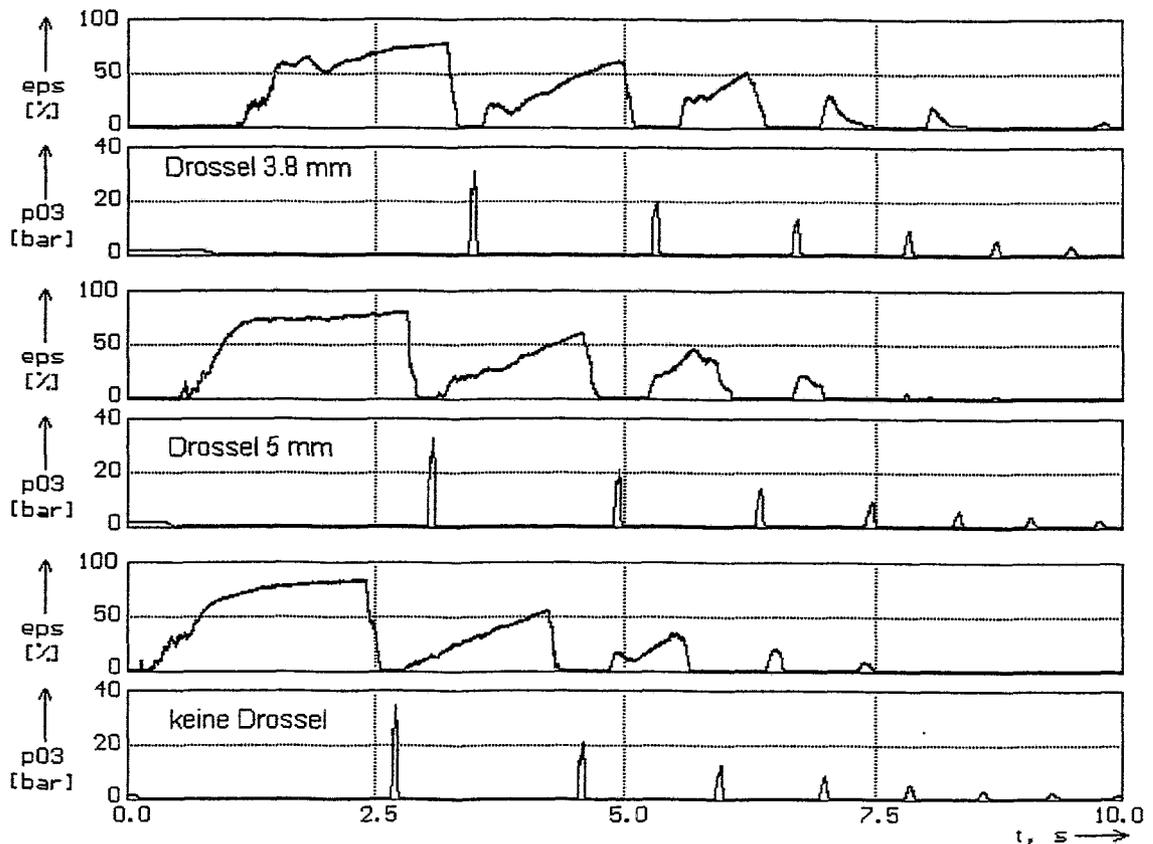


Bild 6.33 Verläufe des mittleren Dampfgehalts und des Drucks hinter der schnellschließenden Klappe bei Verminderung der Schließgeschwindigkeit, $v_0 = 3$ m/s, Versuchstyp C-1,

Sensorposition 0.15 m hinter der Klappe (Experimente 99c173d1, 99c183d1, 99c189d1)

Den Zeitverlauf der axialen Dampfgehaltsverteilungen für die drei Experimente zeigt Bild 6.34. Auch hier findet man ein qualitativ ähnliches Verhalten der Kavitationsblase bei den verschiedenen Schließgeschwindigkeiten. Die Verringerung der Schließgeschwindigkeit ist somit vorzugsweise für die Dämpfung des Druckstoßes vor der schnellschließenden Klappe geeignet. Der Kavitationsschlag im Nachlauf der Klappe kann nur mit großen Schließzeiten verhindert werden, die mit wachsender Länge der Rohrleitung zunehmen. Dies steht meist im Gegensatz zur sicherheitstechnischen Funktion der Klappe, die bei einer Störung die Leitung so schnell wie möglich absperren soll.

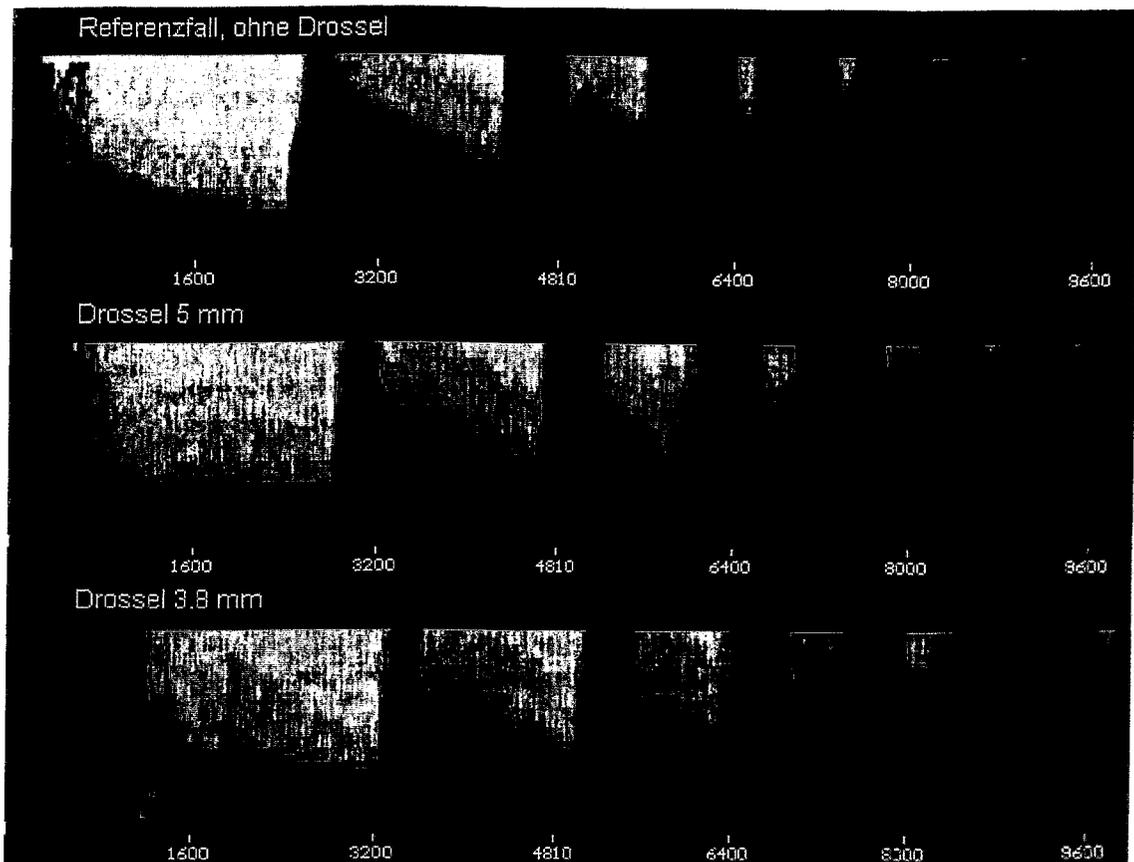


Bild 6.34 Zeitverläufe der axialen Dampfgehaltsverteilung hinter der schnellschließenden Klappe bei Verminderung der Schließgeschwindigkeit, $v_0 = 3 \text{ m/s}$, Versuchstyp C-1,

Sensorposition 0.15 m hinter der Klappe (Experimente 99c173d1, 99c183d1, 99c189d1), x-Achse: Zeit in ms

6.6 Teilschlußversuche

Bei den Teilschlußversuchen wurde die Welle der schnellschließenden Klappe mit einem Anschlag versehen, der bewirkte, daß der Schließvorgang bei einem voreingestellten Öffnungswinkel (Klappenstellung, %, $100\% \equiv 90^\circ$) abrupt unterbrochen wurde. Die Armatur verblieb dadurch in einem teilgeöffneten Zustand. Kavitations-

blasen hinter der Klappe wurden erst bei einem Endöffnungsgrad kleiner gleich 28 % nachgewiesen. Die Zeitverläufe der axialen Dampfgehaltsverteilungen sind für Versuche mit $v_0 = 3$ m/s in Bild 6.35 dargestellt.

Bei einer Endstellung von 28 % wie auch bei 23 % treten zunächst nur Einzelblasen auf, die noch nicht zu einer Kolbenblase zusammenwachsen. Bei der Endstellung 18 % wird erstmalig eine Kolbenblase beobachtet. Unterhalb von 12 % tritt das für die vollständige Absperrung typische Bild der ersten Kavitationsblase mit Stratifikation, d.h. mit Herausbildung der Schichtströmung auf. Eine zweite Kavitationsblase tritt erst bei einem Endöffnungsgrad kleiner gleich 5 % auf.

Beim teilweisen Absperrern wird die Strömungsgeschwindigkeit hinter der Klappe nicht auf null reduziert. Es ist deshalb nicht eindeutig zu unterscheiden, ob die Gasblasen durch Kondensation infolge Strömungsumkehr aus der Meßebene verschwinden oder ob sie mit der Flüssigkeitsströmung weitertransportiert werden. Hierzu wären weitere Gittersensoren oder zumindest ein Einsatz von Nadelsonden erforderlich, um die Beobachtung der Strömung in verschiedenem

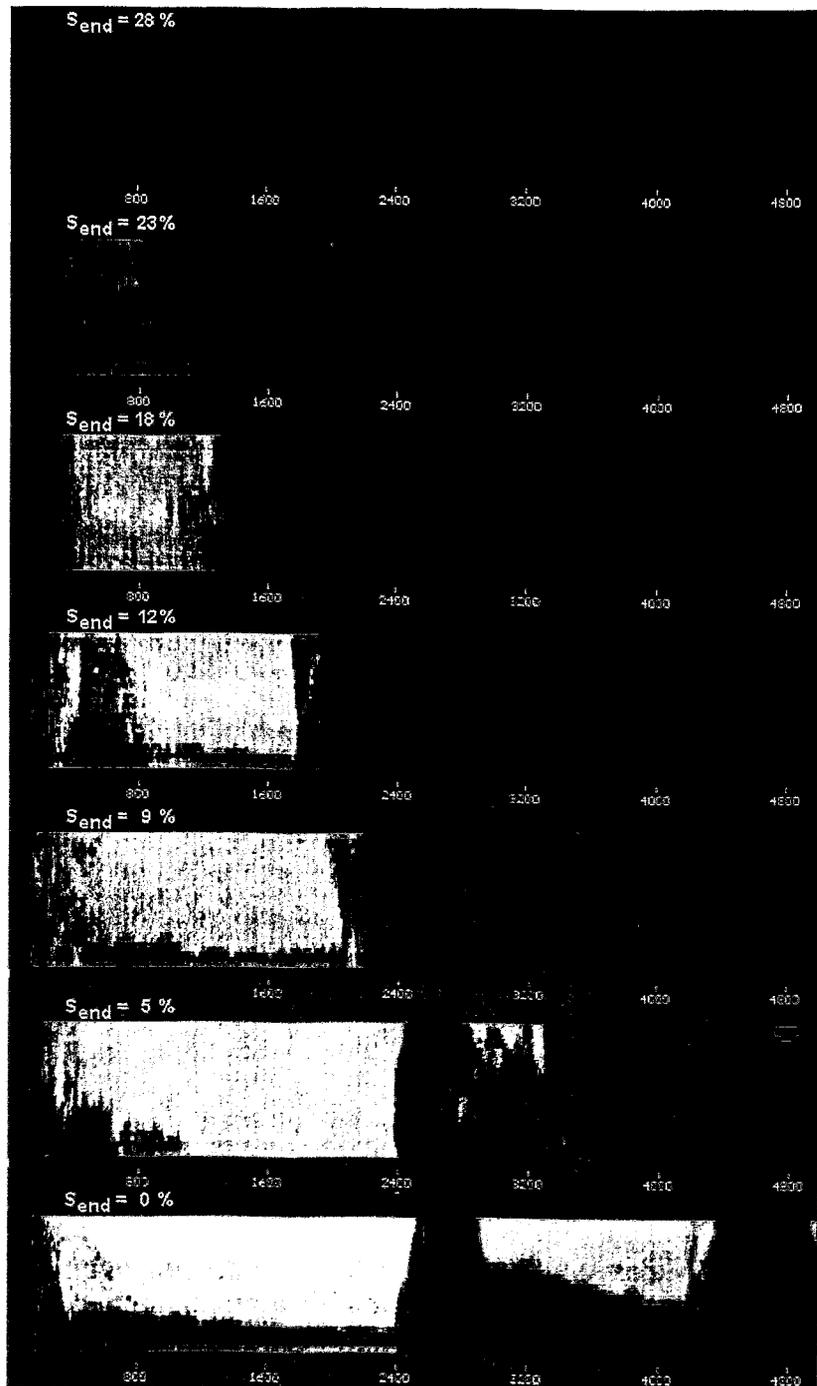


Bild 6.35 Zeitverläufe der axialen Dampfgehaltsverteilung bei den Teischlußversuchen mit $v_0 = 3$ m/s, Versuchstyp D-1

Sensorposition: 0.15 m hinter Klappe, x-Achse: Zeit in ms, Versuche: 99c121d1 - 99c143d1 (Auswahl)

Abstand hinter der Klappe ermöglichen zu können. Leider konnten derartige Experimente aus Kapazitätsgründen im Rahmen des Projekts nicht mehr durchgeführt werden.

Kavitationsschläge wurden erst bei einer Endstellung von kleiner gleich 28 % gefunden, bei der auch Kavitationsblasen erstmalig auftraten. In Bild 6.36 ist eine Gegenüberstellung von Dampfgehaltsverlauf und Klappenstellung mit den Drücken vor und hinter der schnellschließenden Klappe gezeigt.

Vor der Klappe tritt noch während des Schließvorgangs ein Druckstoß auf, der jedoch nur eine Höhe von ca. 6 bar erreicht. Hinter der Klappe erscheint das erste Druckmaximum nachdem der Dampfgehalt am Gittersensor auf Null zurückgegangen ist.

Danach findet sich jedoch eine weitere Phase, in der der Sättigungsdruck erreicht wird und es tritt ein zweiter Druckstoß auf. Das bedeutet, daß in der Leitung weiter hinten, also vom Gittersensor unbemerkt, eine zweite Kavitationsblase aufgetreten sein muß, die anschließend bei ca. $t=3$ s kollabiert ist. Der Dampfgehalt erreicht dabei knapp 20 %.

Bei einer Endstellung von 18 %, wo erstmalig eine kolbenförmige Kavitationsblase beobachtet wurde, sind die Verhältnisse ähnlich (Bild 6.37). Die Kavitationsschläge verschieben sich nach hinten, die maximalen Druckwerte wachsen an. Bei der Endstellung von 5 % registriert der Gittersensor erstmalig ein zweites Dampfgehaltsmaximum (Bild 6.38), d.h. die zweite Kavitationsblase kann sich nicht mehr weit genug vom Sensor entfer-

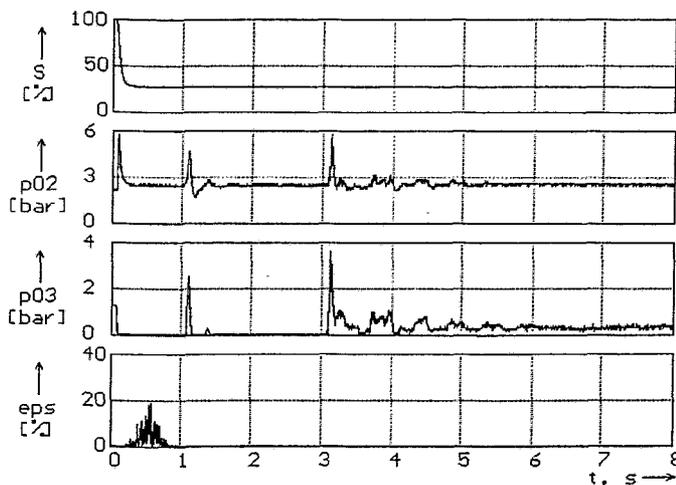


Bild 6.36 Klappenstellung (S), Dampfgehalt (eps) und Drücke vor (p02) und hinter der Klappe (p03) bei einer Endstellung von 28 %, $v_0 = 3$ m/s, Versuch 99c131d1

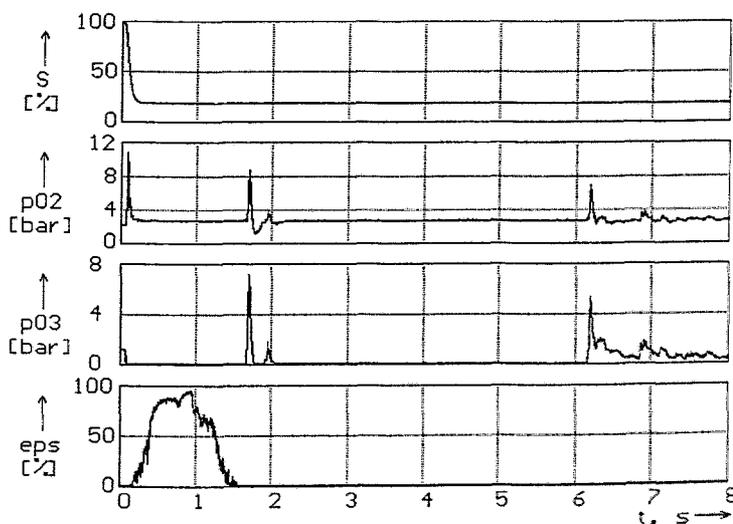


Bild 6.37 Klappenstellung (S), Dampfgehalt (eps) und Drücke vor (p02) und hinter der Klappe (p03) bei einer Endstellung von 18 %, $v_0 = 3$ m/s, Versuch 99c135d1

nen, um nicht registriert zu werden. Allerdings fällt der Druck auch nach dem zweiten Kondensationsschlag erneut auf Sättigungsdruck ab. Bei $t=15$ s (in Bild 6.38 nicht mehr gezeigt) tritt ein drittes Druckmaximum auf. Es liegt die Vermutung nahe, daß das zweite Kavitationsereignis bei $S_{\text{end}} = 28$ % nicht in der horizontalen Rohrleitung, sondern auf der Rohrbrücke auftrat. Bei $S_{\text{end}}=18$ % dürfte das dem Ereignis bei ca. $t=6$ s entsprechen. Dort deutet sich der zweite Kavitationsschlag, der seine Ursache in einer Blase im horizontalen Abschnitt hinter der Klappe hat, als zweites Druckpeak kurz nach dem ersten bei $t=2$ s an. Wahrscheinlich entspricht dieses Peak dem Druckmaximum, das bei $S_{\text{end}}=5$ % nach dem Kollaps der zweiten, vom Gittersensor registrierten Blase beobachtet wurde. Demnach muß bei dem Versuch mit $S_{\text{end}}=18$ % (Bild 6.37) eine solche Blase im horizontalen Rohrabschnitt ebenfalls vorgelegen haben. Diese wurde jedoch durch die anhaltende Flüssigkeitsströmung aus der Meßebene des Sensors herausbewegt.

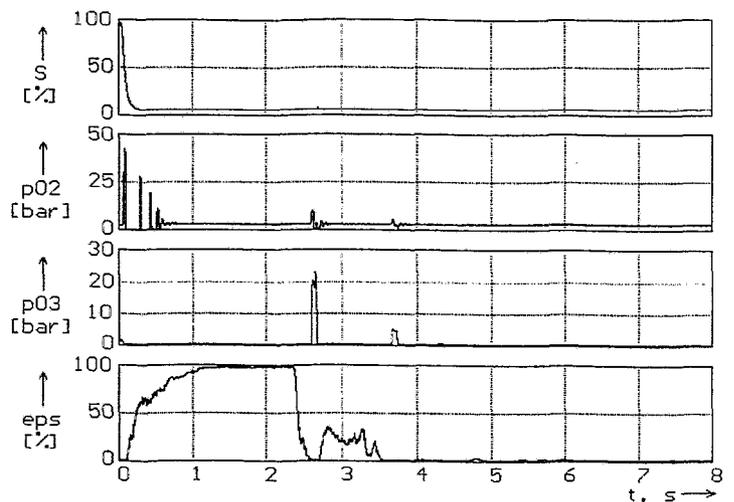


Bild 3.38 Klappenstellung (S), Dampfgehalt (eps) und Drücke vor (p_{02}) und hinter der Klappe (p_{03}) bei einer Endstellung von 5 %, $v_0 = 3$ m/s, Versuch 99c143d1

Mit abnehmender Endstellung nähert sich der Druckverlauf vor der Klappe (p_{02}) zunehmend dem Verhalten bei vollständigem Absperrern an. Während noch bei $S_{\text{end}} = 18$ % unmittelbar nach dem Schließvorgang nur ein einzelner Druckstoß auftrat, werden bei einer Endstellung von 5 % bereits die typischen Mehrfach-Druckstöße beobachtet, die auf die Reflexionen zwischen Klappe und Vorlaufreservoir zurückgehen. Weiterhin ist zu bemerken, daß die Kavitationsschläge bei den Teilschlußversuchen durch die am Ende noch teilweise geöffnete Klappe hindurchlaufen und auf der Zulaufseite ebenfalls zu Druckanstiegen führen. Die Amplitude dieser Peaks nimmt jedoch mit kleiner werdendem Endöffnungsgrad ab.

Insgesamt sind die Vorgänge, die in der Rohrleitung beim Teilschluß der Klappe ablaufen, sehr komplex. Es sind weitere Versuche mit erweiterter Instrumentierung erforderlich, um die Phänomene aufzuklären. Dies hat erhebliche Bedeutung, da der Teilschluß ein praxisrelevanter Prozeß ist, weil er bei schnellen Regelvorgängen auftreten kann.

6.7 Bewertung der Ultraschallmessungen

Bei der Erprobung der Ultraschallmethode an der Druckstoßversuchsanlage traten Schwierigkeiten bei der Anpassung der Aufnehmer an die Rohrleitungen auf. An der Rohrleitung DN100 war es nicht möglich, ein stabiles Transmissionssignal zu empfangen. Auswertbare Ergebnisse liegen nur für DN50 bei den Versuchen mit Klappe im Vorlauf (A-5) und im Rücklauf (A-6) vor. Hierbei zeigte nur das Transmissionssignal charakteristischen Veränderungen, die mit den Verläufen des mittleren Dampfgehalts korrelieren. Die Schwierigkeiten bei der Anpassung der Sensoren an die Rohrleitung führen dazu, daß die Qualität der Signale für die drei eingesetzten Meßstellen sehr unterschiedlich ist. Für ein ausgewähltes Experiment ($v_0 = 4 \text{ m/s}$) sind zur Illustration in Bild 6.39 die Transmissions- und Reflexionssignale der Ultraschallsensoren auf den Positionen 0.25 m und 0.75 m hinter der Klappe, die sich im Vorlauf (A-5) befand, dargestellt.

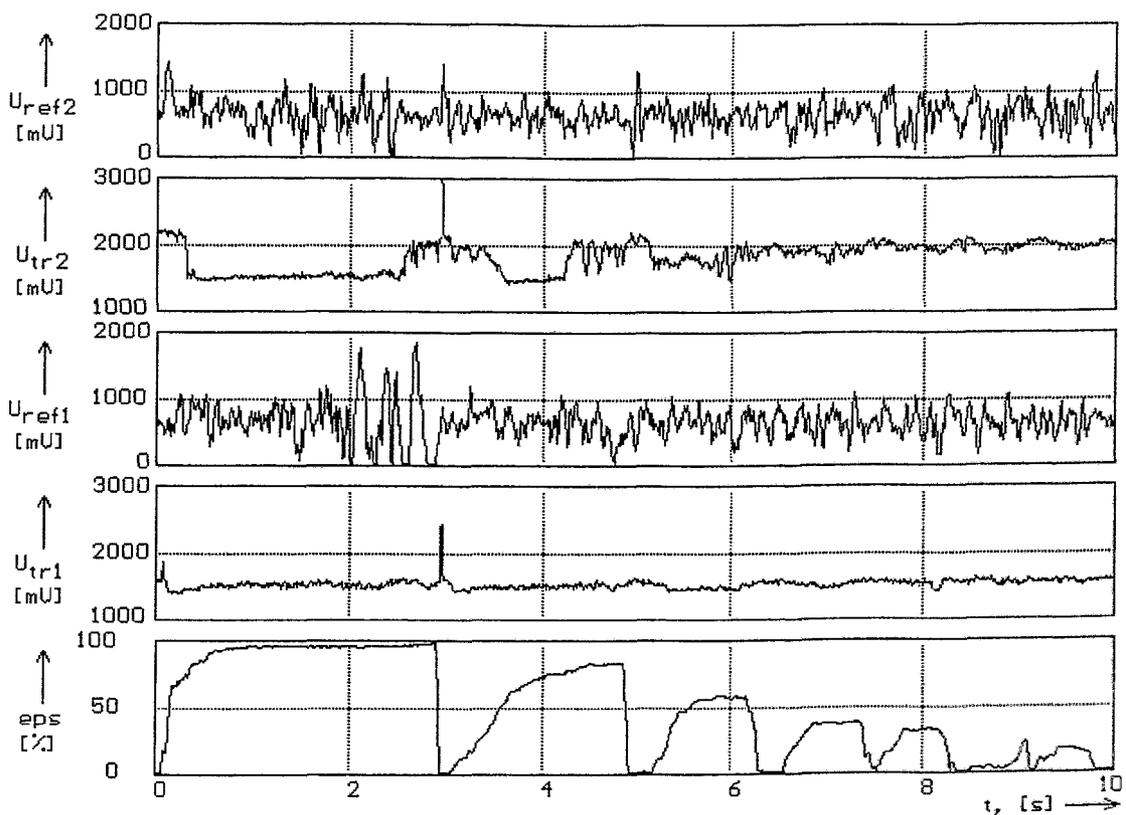


Bild 6.39 Gegenüberstellung von mittlerem Dampfgehalt und Ultraschallsignalen in der Rohrleitung DN50 bei $v_0 = 4 \text{ m/s}$

Versuchstyp A-5, Experiment 32c02dn5

Utr,1 - Transmissionssignal, Abstand 0.25 m hinter Klappe

Utr,2 - Transmissionssignal, Abstand 0.75 m hinter Klappe

Uref,1 - Reflexionssignal, Abstand 0.25 m hinter Klappe

Uref,2 - Reflexionssignal, Abstand 0.75 m hinter Klappe

eps - Gittersensor

Während an der ersten Meßposition eine Änderung der Transmissionsamplitude nur andeutungsweise zu erkennen ist, lieferte das zweite Aufnehmerpaar deutliche Signale. Die Reflexionssignale konnten nicht interpretiert werden. An der Leitung DN50 wurden leider keine Nadelsondenmessungen durchgeführt,

die zum Vergleich hätten herangezogen werden können. Für die nähere Betrachtung der Transmissionssignale wurden diese deshalb mit der rechnerischen Ausdehnung der Kavitationsblase bei verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten verglichen. Da das Modell (Abschnitt 6.2.4) mit den Parametern aus Tabelle 6.2 etwas zu große Zeiten bis zum Auftreten des ersten Kondensationsschlages liefert (vgl. Bild 6.21), wurde das Modell anhand der Dampfgehaltsverläufe des Gittersensors kalibriert. Dabei

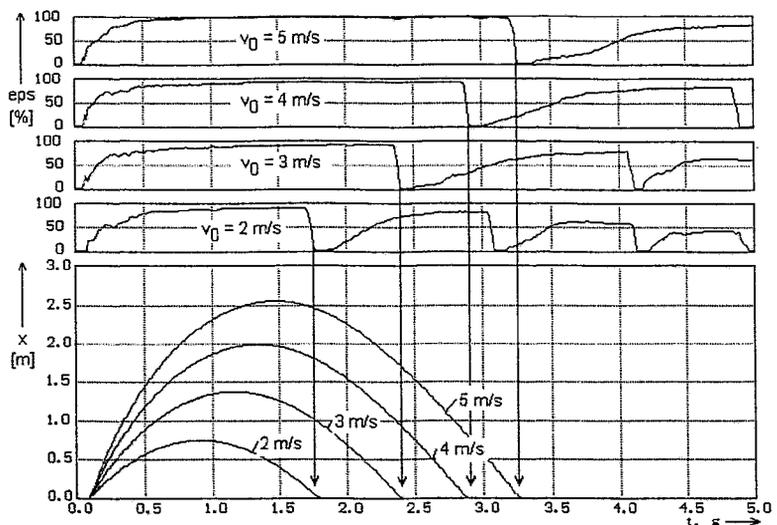


Bild 6.40

Kalibrierung des Modells der Kavitationsblase anhand der Dampfgehaltsverläufe des Gittersensors

- x - momentane axiale Ausdehnung der Kavitationsblase
- eps - mittlerer Dampfgehalt

wurde der Rohrreibungsbeiwert an den Zeitpunkt des Kondensationsschlages bei $v_0 = 5$ m/s angepaßt und die Schließzeit von ca. 0.1 s als anfängliche Verzögerung berücksichtigt. Wie in Bild 6.40 zu erkennen ist, liefert das Modell bei Annahme eines auf $\zeta_{\text{Rohr}} = 0.0313$ vergrößerten Beiwerts eine gute Übereinstimmung mit den Dampfgehaltsverläufen nicht nur bei $v_0 = 5$ m/s, wo die Anpassung erfolgte, sondern auch bei den anderen realisierten Anfangsgeschwindigkeiten.

Im weiteren wurden die so kalibrierten Zeitverläufe genutzt, um die Transmissionssignale des 2. Aufnehmerpaars bei $x = 0.75$ m zu untersuchen. Wie in Bild 6.41 zu erkennen ist, korrelieren die Änderungen der Intensität des Durchschallungssignals mit den Durchgängen der Kavitationsblase bzw. des Schwall. Im weiteren Verlauf treten unregelmäßige Signale auf, die auf Luftblasen zurückgeführt werden müssen.

Insgesamt konnte gezeigt werden, daß sich die Ultraschalltransmission für den Nachweis von Dampf bzw. Gas im Rohrleitungsquerschnitt eignet. Bei der verwendeten Durchschallung in senkrechter Richtung führt praktisch jede am Scheitelpunkt des Rohrleitungsquerschnitts befindliche Blase zu einer starken Schwächung des Ultraschalls, so daß eine quantitative Aussage über den Dampf- bzw. Gasgehalt nicht möglich ist. Die Ultraschallaufnehmer können deshalb zu ähnlichen Zwecken herangezogen werden, wie die Nadelsonden, d.h. sie eignen sich zur Verfolgung

der axialen Ausdehnung bzw. Bewegung von Kavitationsblasen. Für einen praktischen Einsatz muß jedoch die Qualität der Sensoren, der Signalverarbeitung und der Anpassung an die Rohrleitung verbessert werden.

Beim Einsatz bei Druckstoßversuchen treten allerdings gelegentlich zusätzliche Signalpeaks auf, die auf Schallemissionen durch Druckstöße zurückgehen. Solche Peaks sind in den Bildern 6.39 und 6.41 zu einigen Zeitpunkten zu erkennen. Aufgrund ihrer kurzen Dauer behindern sie jedoch die Interpretation der Signale kaum.

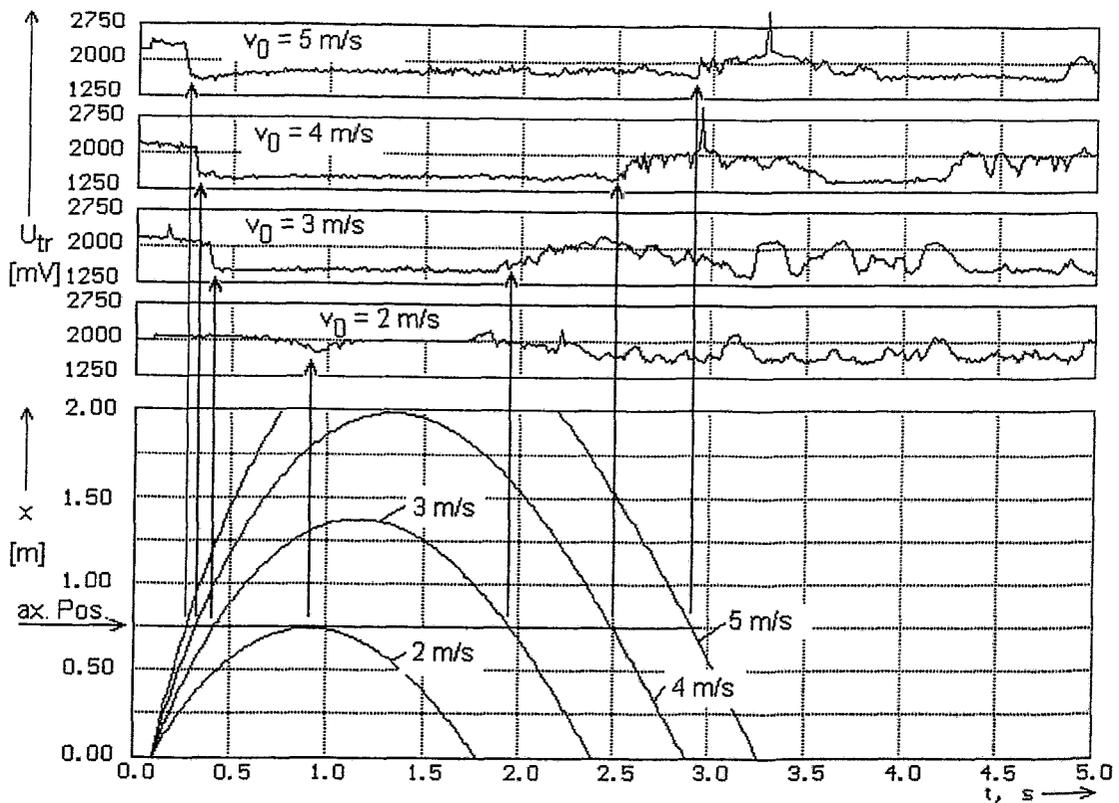


Bild 6.41 Transmissionssignale U_{tr} an der Meßstelle 2 (0.75 m hinter der Klappe) im Vergleich zum Verlauf der rechnerischen Ausbreitung der Kavitationsblase x .

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens wurde eine neue Qualität der experimentellen Charakterisierung von Zweiphasenphänomenen erreicht, die bei Druckschlägen in Rohrleitungen auftreten. Schwerpunkt bildet die erfolgreiche Anwendung von speziell zugeschnittenen Gittersensoren für die Messung der Dampf- bzw. Gasgehaltsverteilung im Strömungsquerschnitt mit einer hohen zeitlichen Auflösung. Mit 1024 Messungen pro Sekunde wurde die bisher zugängliche Zeitauflösung hinsichtlich der Erfassung des gesamten Strömungsquerschnitts um etwa eine Größenordnung überboten.

Weiterhin wurden die in Rossendorf seit einigen Jahren erfolgreich eingesetzten nadelförmigen Leitfähigkeitssonden an die Bedingungen der Druckstoß-Versuchsanlage angepaßt und eingesetzt. Mit ihrer Hilfe wurde der Prozeß der Kavitation hinter der Schnellschlußarmatur in seiner Ausdehnung in Strömungsrichtung dargestellt.

Zu Beginn der Projektbearbeitung war nicht eindeutig vorherzusehen, welche mechanischen Belastungen auf die genannten invasiven Sensoren zukommen. Es wurde daher bei der Auslegung großer Wert auf eine robuste Gestaltung gelegt. Die Gittersensoren wurden mit stabilen Elektrodenstäbchen aus Edelstahl ausgerüstet, die einen linsenförmigen Querschnitt aufweisen, um die Druckverluste zu minimieren. Die Nadelsonden wurden mit Hilfe einer speziellen Testvorrichtung stufenweise an die hohen mechanischen Belastungen angepaßt. Im Resultat wurde bei beiden Sensortypen eine ausgezeichnete Standfestigkeit erreicht, die es ermöglichte, umfangreiche Meßserien ohne Ausfälle zu realisieren.

Für den Fall, daß dieses Ziel nicht hätte erreicht werden können, wurde eine Ultraschallinstrumentierung aufgebaut. Ein zweiter Gesichtspunkt für diese Entscheidung war die Bestrebung nach einem nichtinvasiven und damit rückwirkungsfreien Alternativverfahren. Es konnte gezeigt werden, daß die Ultraschalltransmission bei zielgerichteter Weiterentwicklung des Verfahrens zur Verfolgung von Kavitationsblasen in der Rohrleitung verwendet werden kann. Bisher blieb die Qualität der Meßsignale jedoch weit hinter den Ergebnissen der Gittersensoren und Nadelsonden zurück.

Die eingesetzten Meßverfahren wurden zuvor an der Zweiphasen-Testschleife des FZR in einer Luft-Wasser-Strömung erprobt. Durch Vergleich mit einer Gamma-Durchstrahlungseinrichtung, die mittlere Gasgehalte lieferte, wurde die Meßgenauigkeit ermittelt.

Hinsichtlich der Kavitationsphänomene selbst wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Hinter einer schnellschließenden Klappe treten großräumige Kavitationsblasen auf, deren maximale Ausdehnung in Strömungsrichtung mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit und Rohrleitungslänge anwächst. Innerhalb der Kavitationsblase liegt kurze Zeit nach dem Schließen der Armatur eine geschichtete Strömung vor.
- Die durch den Gegendruck abgebremste und erneut in Richtung auf die Armatur beschleunigte Flüssigkeitssäule prallt als Schwall auf die geschlossene Armatur,

wodurch der Kavitationsschlag entsteht. Nachfolgend werden durch Reflexionen der Druckwelle weitere Kavitationsblasen erzeugt.

- In der Klappe tritt während des Schließvorgangs Kavitation auf. Die charakteristischen Dampfgehaltsverteilungen sind stark transient und weisen ausgeprägte räumliche Verteilungen auf.
- Infolge der Verdampfung kommt es während der Kavitation auch zum Ausgasen von nichtkondensierbaren Gasen, wenn solche in der Flüssigphase gelöst vorliegen.
- Auf Rohrbrücken kann es nach dem Schnellschluß zu einem Abreißen der Strömung infolge Verdampfung kommen. Die dabei gebildete Kavitationsblase kann zusätzliche Druckstöße verursachen, die sowohl beim Wiederauffahren der Leitung als auch spontan bei weiterhin geschlossener Absperrarmatur auftreten können.
- Die Unterbrechung der Flüssigkeitssäule durch die Kavitation auf der Rohrbrücke führt zu einer wesentlichen Verringerung der Periode der Kavitationsschläge gegenüber der Anlagenkonfiguration, bei der die Rohrbrücke durch einen Bypass ersetzt wurde.
- Auch vor der schnellschließenden Armatur treten unter bestimmten Bedingungen Kavitationsblasen auf, wenn die anfängliche Druckwelle vom Anfang der Rohrleitung als Entspannungswelle reflektiert wird und zurückkehrt. Dies wurde bei den Experimenten beobachtet, bei denen die Klappe im Rücklauf der Druckstoßanlage installiert war.
- Eine Verminderung der Schließgeschwindigkeit führt zu keiner wesentlichen Abnahme der Kavitationsschläge, solange die Schließzeit kleiner ist, als die Zeitdauer bis zum Auftreten des ersten Kavitationsschlages. Die Dampfgehaltsverläufe bleiben bis auf eine zeitliche Verzögerung weitgehend unverändert. Die Druckstöße auf der Zulaufseite werden durch die Verminderung der Schließgeschwindigkeit stark reduziert.
- Bei einem unvollständigen Schließvorgang (Teilschluß) wird bei Unterschreitung eines bestimmten minimalen Endöffnungsgrades ein Kavitationsschlag ausgelöst. Die Amplitude der Druckstöße nimmt mit abnehmendem Endöffnungsgrad zu. Die gebildeten Dampfblasen werden zunächst von der weiterströmenden Flüssigkeit in die Rohrleitung hinter der Klappe hinein transportiert.
- Bei Teilschluß der Klappe können wahrscheinlich bereits vor dem Wiederöffnen heftige Druckstöße durch Kavitation auf der Rohrbrücke auftreten. Die bei Teilschluß ablaufenden Prozesse müssen mit erweiterter Instrumentierung detaillierter untersucht werden.
- Bei der Zudosierung von Luft werden die Druckstöße mit wachsendem Volumenstromanteil der Luft zunehmend gedämpft. Während des Druckmaximums wird die in der Rohrleitung vorhandene Luft komprimiert. Der Gasanteil geht dabei auf einen endlichen, von Null verschiedenen Wert zurück.

Die gewonnenen Meßdaten stellen die Basis für eine zukünftige detaillierte Modellierung der Zweiphasenströmung bei Kavitation dar. Im Rahmen der Arbeiten wurde ein einfaches, eindimensionales Modell aufgestellt, das die Bewegung der Flüssigkeitssäule aufbauend auf der Impulserhaltungsgleichung beschreibt. Es wurde mit den Versuchsergebnissen mit den folgenden Ergebnissen gegenübergestellt:

- Das Modell liefert eine gute Übereinstimmung mit den Experimenten hinsichtlich der Zeit, die vom Schnellschluß bis zum ersten Kavitationsschlag verstreicht. Das Modell berechnet auch die Endgeschwindigkeit beim Aufprall der Flüssigkeitssäule auf die geschlossene Klappe mit guter Genauigkeit, wodurch die Bestimmung der Höhe der zu erwartenden Druckspitzen möglich ist.
- Die maximale Ausdehnung der Kavitationsblase in Strömungsrichtung wird durch das Modell unterbewertet. Die dem Modell zugrunde liegende Annahme, daß sich die Flüssigkeit wie ein Kolben bewegt, führt zu dieser Abweichung. In der Realität bildet sich eine Schichtströmung, wodurch sich die Blase weiter in die Rohrleitung hinein ausbreiten muß, als es die vereinfachte Theorie vorhersagt, um das gebildete Dampfvolumen aufnehmen zu können.

Bei den Untersuchungen blieben folgende Fragen offen bzw. wurden folgende neuen Fragestellungen aufgeworfen:

- Verschiedene geometrische Konfigurationen blieben bisher unbetrachtet, wie z.B. die Anordnung der schnellschließenden Klappe in senkrechten oder geneigten Rohrleitungsabschnitten inklusive der Durchströmung einer solchen Klappe von oben nach unten sowie die Anordnung der Klappe auf einer Rohrbrücke.
- Die Zweiphasenphänomene bei bekannten Verfahren zur Verhinderung bzw. Dämpfung von Druckschlägen (Windkessel, Belüftungsventile) wurden noch nicht untersucht.
- Die Vorgänge bei Teilschluß von Absperrarmaturen müssen mit erweiterter Instrumentierung detaillierter untersucht werden. Durch die Parallelität zu Steuerungseingriffen bei der Durchflußregelung sind diese Vorgänge von großer Praxisrelevanz.
- Ausgehend von der Charakterisierung der Kavitationsprozesse gilt es, Verfahren oder Anordnungen zu entwickeln, die Kavitationsschläge verhindern oder ihre Auswirkungen vermindern können. Diese Verfahren müssen experimentell erprobt werden.
- Die Modellierung der Zweiphasenströmung, die bei Kavitation auftritt, muß auf Grundlage der erhaltenen Meßdaten weiterentwickelt werden. Die Modelle sind für eine Auslegung von Rohrleitungen, Armaturen und druckstoßvermindernden Einrichtungen notwendig. Mit den Modellen soll die Übertragung der Ergebnisse von einer einfachen Rohrleitung auf komplizierte Rohrleitungssysteme erfolgen. Zur Verifikation dieser Modelle sind auch ausgewählte Versuche an komplexeren Rohrleitungskonfigurationen erforderlich.
- Es sind weitere Experimente zum Einfluß von Stoffwerten und Betriebsparametern notwendig. Zu variieren ist die Temperatur, der Systemdruck, die Zähigkeit, die

Oberflächenspannung und die stoffliche Zusammensetzung des Strömungsmediums.

- Die Entwicklung der Instrumentierung soll fortgesetzt werden. Schwerpunkt ist die weitere Erhöhung der räumlich-zeitlichen Auflösung der Gittersensoren. Auf dem Gebiet der Ultraschallmeßtechnik wird eine Verbesserung der Signalqualität und der Reproduzierbarkeit der Anpassung der Aufnehmer an die Rohrleitung angestrebt.

Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Erarbeitung von Methoden zur Verhinderung von Druckstößen und Kavitationsschlägen. Es ist vorgesehen, die Ergebnisse im Kontakt mit industriellen Partnern für die Lösung von praktischen Problemen in realen verfahrenstechnischen Anlagen zu nutzen. Weiterhin wird eine Fortsetzung der Untersuchungen zur Aufklärung der noch offenen Fragen angestrebt.

8 Anhang

8.1 Literatur

- [1] A. Baldauf, H.-M. Prasser, G. Tamme, W. Zippe:
Nadelsonde zur Messung der Leitfähigkeit in Flüssigkeiten oder Mehrphasengemischen , Offenlegungsschrift DE 43 20 116, 16.06.1993
- [2] H.-M. Prasser, et al.:
Beobachtung des Loop-Seal-Clinings in der Integralanlage PMK-NVH des KFKI Budapest mit Nadelsonden,
Kernenergie 34(1991), H. 1, S. 21-24
- [3] H.-M. Prasser, P. Schütz, F. Hensel:
Untersuchung der Struktur und zur Messung von Parametern einer Zweiphasenströmung mit Hilfe von Ultraschall,
Abschlußbericht zum BMFT-Fördervorhaben 1599 937
- [4] H.-M. Prasser, P. Schütz, F. Hensel:
Messung der Volumenströme von Gas und Flüssigkeit einer Zweikomponentenströmung mit Hilfe von Ultraschall und Mustererkennung,
Vortrag auf: Internationales Treffen für Chemische Technik und Biotechnik, AICHEM, Frankfurt, 5.-11. 07. 1994
- [5] H.-M. Prasser, A. Böttger, J. Zschau:
Anordnung zur Messung der lokalen Leitfähigkeiten in Fluiden,
Offenlegungsschrift DE 197 04 609 A1, 7.2.1997
- [6] I. D. Johnson:
Method and Apparatus for Measuring Water in Crude Oil, United States Patent, No 4,644,263, Date of Patent: Feb. 17, 1987
- [7] M. Boden, N. Reinecke, D. Mewes:
Measurement of two-dimensional phase distributions using a wire-mesh sensor, Proc. ECAPT, Oporto, Portugal, 1994 pp.155-162]
- [8] A. Böttger, H.-M. Prasser, J. Zschau:
Gittersensor zur Bestimmung der Leitfähigkeitsverteilung in strömenden Medien sowie Verfahren zur Gewinnung der Meßsignale,
Offenlegungsschrift 196 49 001.1, 27.11.1996
- [9] A. Böttger, H.-M. Prasser, J. Zschau:
Hochauflösende Gittersensoren für Gas-Flüssig-Strömungen
MSR Magazin 1-2/1998, S. 12-15
- [10] H.-M. Prasser, A. Böttger, J. Zschau:
A new electrode-mesh tomograph fo gas-liquid flows,
Flow Measurement and Instrumentation 9 (1998) 111-119.

8.2 Formelzeichen

a	Schallgeschwindigkeit, m/s
$a_{x,y}$	Gewichtskoeffizienten für Mittelung über Querschnitt
D	Durchmesser der Rohrleitung, m
eps_x	lokaler Dampfgehalte gemessen von der Nadelsonde x
$\text{eps}, \bar{\epsilon}$	mittlerer Dampfgehalt Gittersensor
$\bar{\epsilon}_D$	linearer mittlerer Dampfgehalt über Durchmesser, Gittersensor
$\dot{\epsilon}$	Volumenstromanteil
$\dot{\epsilon}_N$	Volumenstromanteil bei Normalbedingungen
g	Erdbeschleunigung, m/s ²
h	Höhe, m
$I_{sw,i}$	Signalstrom bei Wasser-Eichung, A
$I_{s,i}$	Signalstrom bei der Messung, A
J_L	Volumenstromdichte des Gases (Luft), m/s
J_w	Volumenstromdichte der Flüssigkeit (Wasser), m/s
$k_{i,j}$	Sondenkonstante an der Position i,j , 1/m
L	Rohrleitungslänge, m
p	Druck, bar
p_{xx}	Druck an der Position xx , bar
p_G	Gegendruck am Rohrleitungsende, bar
p_S	Sättigungsdrucks in der Kavitationsblase, bar
R_A	Schutzwiderständen der Ausgangsstufen, Ω
$r_{x,y}$	Radius des Meßpunkts mit den Koordinaten x, y
S	Öffnungsgrad, % (100 % \equiv Stellung 90° \equiv offen)
t	Zeit, s
$U_{i,j}$	Meßsignal, Spannung, V

$U_{W,corr,i,j}$	korregierter Kalibrierwert, V
$U_{W,i,j}$	Kalibrierwert bei bei Rohrleitung mit Wasser gefüllt, V
$U_{L,i,j}$	Kalibrierwer bei Rohrleitung mit Luft gefüllt, V
$U_{S,i}$	Spannung an einer Sendeelektrode i, V
V_E	Verstärkung der Eingangsstufen der Gittersensorelektronik, V/A
V	Verstärkung
v	Geschwindigkeit, m/s
v_0	Anfangsgeschwindigkeit des Wassers in der Rohrleitung, m/s
v_1	Endgeschwindigkeit beim Auftreffen des Schwallts auf die geschlossene Klappe, m/s
x	Weg, Abstand, Koordinate, m
y	Koordinate, m
Δh	Höhenänderung, m
Δp_{ges}	Gesamtdruckverlustes, bar
$\Delta U_{i,j}$	Spannungshub an der Position i,j, V
Δx	Abstand Achse Klappe - Sensor, m
$\epsilon_{i,j}$	Flüssigkeitsanteil
ρ_w	Dichte der Flüssigkeit (Wasser), kg/m ³
$\sigma_{i,j}$	örtliche Leitfähigkeit, S/m
ζ_{lokal}	Beiwert der lokalen Druckverluste (Krümmer)
ζ_{Rohr}	Druckverlustbeiwert der Rohrleitung

8.3 Glossar

ADC	Analog-Digital-Konverter
bit	zweiwertige Information in einer dualen Einheit
Byte	Binärzahl mit acht bit
COM-Schnittstelle	serielle Schnittstelle am PC
EPROM	elektrisch programmierbarer Lesespeicher
DNxx	Normnennweite xx mm
DC/DC Wandler	Gleichspannungswandler (Stromversorgungsbaustein)
Duplexkanal	Datenübertragungsmedium mit zwei Übertragungsrichtungen
FPGA	anwenderspezifischer Schaltkreis
FZR	Forschungszentrum Rossendorf
MSB	höchstwertiges Bit einer Binärzahl
OPV	Operationsverstärker
PC	Personalcomputer
RAM	Lese-Schreib-Speicher
RS232	serielles Interface zur Übertragung von Daten
UMSICHT	Fraunhofer Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik e.V.Oberhausen

8.4 Bilderverzeichnis

3.1	Perspektivische Ansicht der Druckstoßanlage im Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik e.V. Oberhausen	6
3.2	Meßpositionen der Kraft- und Druckaufnehmer an der Druckstoßanlage	7
4.1	Schwerpunktmäßiger Einsatz der FZR Meßtechnik in der UMSICHT-Anlage	10
4.2	Strukturbild des Nadelsonden-Meßsystems	11
4.3	Prinzipschaltbild der Nadelsondenansteuerung und Meßwertgewinnung	12
4.4	Druckfeste Dreielektroden-Nadelsonden mit Signalkabel	13
4.5	Prinzipbild einer Dreielektroden-Nadelsonde mit Vorverstärker	14
4.6	4-Kanal-Nadelsonden-Meßsystem	14
4.7	Laborgittersensor mit 2 x 16 Elektrodendrähten von 0,12 mm Durchmesser	16
4.8	Vereinfachtes Strukturbild des Gittersensor-Meßsystems	17
4.9	Druckfester Sensor für den industriellen Einsatz mit 2 x 8 Elektroden	17
4.10	Druckfester Sensor für den industriellen Einsatz mit 2 x 16 Elektroden	19
4.11	Druckfester Industriesensor DN100 mit 2 x 8 Elektroden	19
4.12	Ansteuer- und Auswerteelektronik für Gittersensoren (Prototyp)	20
4.13	Strukturbild des Ultraschall-Meßsystems	21
4.14	Ultraschall-Meßsystem mit Sensoren, Meßwertumformer, sowie Anpass- und Übertragungsmodul	22
4.15	Opto-elektrische Wandlereinheit	26
5.1	Rohsignale des Gittersensors am Meßpunkt $i=4$, $j=4$ bei Kavitation hinter der schnellschließenden Klappe	29
5.2	Zweiphasentestschleife mit Instrumentierung	33
5.3	Genauigkeit der Volumenstrommessung für Luft und Wasser	34
5.4	Versuchsmatrix, Volumenstromdichten bezogen auf Normalbedingungen	35
5.5	Tatsächliche Volumenstromdichten am Meßort unter Berücksichtigung der Kompressibilität der Gasphase	35
5.6	Gittersensoren an der Zweiphasen-Testschleife	35
5.7	Gegenüberstellung Nadelsonden - Gamma-Densitometer, lineare Mittelwerte des Gasanteils	36

5.6	Gittersensoren an der Zweiphasen-Testschleife	35
5.7	Gegenüberstellung Nadelsonden - Gamma-Densitometer, lineare Mittelwerte des Gasanteils	36
5.8	Gegenüberstellung Gittersensoren - Gamma-Densitometer, lineare Mittelwerte des Gasanteils	36
5.9	Vergleich Drahtgittersensor - Gamma-Densitometer	37
5.10	Ultraschall-Transmissionssignal in Abhängigkeit vom mittleren Gasanteil	38
5.11	Ultraschall-Reflexionssignal in Abhängigkeit vom mittleren Gasanteil	38
5.12	Dampfgehaltsmessung durch Ultraschalltransmission, Vergleich der Gasanteile nach Gl. (5.15) mit den Werten des Drahtgittersensors	39
6.1	Verläufe der Klappenstellung (s), des mittleren Dampfgehalts (ϵ) und der Drücke vor (p_02) und hinter (p_03) der Klappe	41
6.2	Dampfgehaltsverläufe und Druck hinter der Klappe (Versuch 165cbm02)	42
6.3	Gegenüberstellung der Signale des Gittersensors auf zwei unterschiedlichen axialen Positionen und der Druckverlauf hinter der Klappe	43
6.4	Dampfgehaltsverteilung in der Meßebebene $\Delta x=0.15$ m	44
6.5	Dampfverteilung bei $t=150$ ms	45
6.6	Pseudo-Seitenansicht der Verdampfung bei Kavitation, Sensorposition $x = 0.15$ m	45
6.7	Pseudo-Seitenansicht der Verdampfung bei Kavitation, Sensorposition $x = 1.5$ m, Zeitauflösung: 8 ms	45
6.8	Ausschnitt aus Bild 6.7, maximale Zeitauflösung von ca. 1 ms	46
6.9	Dampfgehalt hinter der Klappe bei verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten, Versuchstyp A-1	46
6.10	Verlauf des mittleren Dampfgehalts im horizontalen Teil der Rohrleitung auf der Rohrbrücke, Nadelsondensignale und Druckverläufe, $v_0=3$ m/s, Versuch 99cbm26, Versuchstyp A-1	47
6.11	Pseudo-Seitenansicht der Strömung im horizontalen Abschnitt der Rohrbrücke, 99cbm27, $v_0=3$ m/s, Versuchstyp A-1	48
6.12	Verlauf des mittleren Dampfgehalts im horizontalen Teil der Rohrleitung auf der Rohrbrücke, Nadelsondensignale und Druckverläufe, $v_0=3$ m/s, Versuch 99cbm26, Versuchstyp A-1	50
6.13	Vergleich der Dampfgehaltsverläufe 0.15 m hinter der Klappe mit und ohne den Einfluß der Rohrbrücke, $v_0=3$ m/s, Versuchstypen A-1 und A-3	51

6.14	Verlauf des mittleren Dampfgehalts und Sondensignale bei Schnellschluß in der Rohrleitung ohne Rohrbrücke, $v_0=2$ m/s, Versuch 66cbm28, Versuchstyp A-3, Δx - Abstand Achse Klappe - Sensor	51
6.15	Dampfgehalt 0.15 m hinter der Klappe bei verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten, Versuchstyp A-3 (Bypass Rohrbrücke)	52
6.16	Dampfgehalt 0.15 m hinter der Klappe bei verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten, Versuchstyp A-4 (Klappe im Rücklauf)	53
6.17	Zeitpunkt des ersten Kavitationsschlages in Abhängigkeit von der Anfangsgeschwindigkeit der Flüssigkeit	55
6.18	Axiale Ausbreitung der Kavitationsblase als Funktion der Zeit bei $v_0=2$ m/s (Versuch 66cbm28)	56
6.19	Axiale Ausbreitung der Kavitationsblase als Funktion der Zeit bei $v_0=4$ m/s (Versuch 132cbm24)	57
6.20	Axiale Ausbreitung der Kavitationsblase als Funktion der Zeit bei $v_0=4$ m/s (Versuch 132cbm62), veränderte Sondenordnung	58
6.21	Abhängigkeit der maximalen theoretischen Ausdehnung der Kavitationsblase von der Anfangsgeschwindigkeit v_0	59
6.22	Abhängigkeit der maximalen theoretischen Ausdehnung der Kavitationsblase von der Anfangsgeschwindigkeit v_0 (DN100)	60
6.23	Abhängigkeit der Endgeschwindigkeit beim Auftreffen des Flüssigkeitsschwalls v_1 auf die geschlossene Klappe von der Anfangsgeschwindigkeit v_0	61
6.24	Verläufe des mittleren Dampfgehalts unmittelbar hinter der Klappe für ausgewählte Anfangsgeschwindigkeiten, Vergleich DN50 - DN100, Klappe im Vorlauf (A-1 bzw. A-5)	62
6.25	Sequenz von Dampfgehaltsverteilungen hinter der Klappe in der Rohrleitung DN50 bei $v_0=4$ m/s während des Schließvorgangs (Versuch 32c01dn5)	63
6.26	Zeitverlauf der axialen Dampfgehaltsverteilungen während der ersten zwei Kavitationszyklen, $v_0=4$ m/s, Versuch 32c01dn5	64
6.27	Zeitverläufe der axialen Dampfgehaltsverteilungen bei verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten, DN50, Klappe im Rücklauf (A-6)	65
6.28	Effekt der Zusp eisung von Luft auf die Kavitationsschläge und die Dampf- bzw. Gasgehaltsverläufe hinter der Klappe, $v_0 = 5$ m/s, Versuchstyp B-1	66
6.29	Zeitverlauf der axialen Dampf- bzw. Gasverteilung sowie ausgewählte Querschnittsbilder für $v_0=5$ m/s, 2 % Luftzusp eisung, Versuchstyp B-1, Versuch 165cbm07	67

6.30	Verläufe des mittleren Gasanteils während der ersten 500 ms in Abhängigkeit von der Luftzuspeisung	67
6.31	Gas- bzw. Dampfgehaltsverteilungen bei $v_0 = 5$ m/s und einem Volumenstromanteil der zugespeisten Luft von 1 % (A-5, Versuch 165c04d1)	68
6.32	Verläufe des Drucks p_{02} vor der schnellschließenden Klappe und des Schließwinkels S bei Verminderung der Schließgeschwindigkeit, $v_0 = 3$ m/s, Versuchstyp C-1 (Experimente 99c173d1, 99c183d1, 99c189d1)	69
6.33	Verläufe des mittleren Dampfgehalts und des Drucks hinter der schnellschließenden Klappe bei Verminderung der Schließgeschwindigkeit, $v_0 = 3$ m/s, Versuchstyp C-1	70
6.34	Zeitverläufe der axialen Dampfgehaltsverteilung hinter der schnellschließenden Klappe bei Verminderung der Schließgeschwindigkeit, $v_0 = 3$ m/s, Versuchstyp C-1	71
6.35	Zeitverläufe der axialen Dampfgehaltsverteilung bei den Teilschlußversuchen mit $v_0 = 3$ m/s, Versuchstyp D-1	72
6.36	Klappenstellung (S), Dampfgehalt (ϵ_{ps}) und Drücke vor (p_{02}) und hinter der Klappe (p_{03}) bei einer Endstellung von 28 %, $v_0 = 3$ m/s, Versuch 99c131d	73
6.37	Klappenstellung (S), Dampfgehalt (ϵ_{ps}) und Drücke vor (p_{02}) und hinter der Klappe (p_{03}) bei einer Endstellung von 18 %, $v_0 = 3$ m/s, Versuch 99c135d1	73
6.38	Klappenstellung (S), Dampfgehalt (ϵ_{ps}) und Drücke vor (p_{02}) und hinter der Klappe (p_{03}) bei einer Endstellung von 5 %, $v_0 = 3$ m/s, Versuch 99c143d1	74
6.39	Gegenüberstellung von mittlerem Dampfgehalt und Ultraschallsignalen in der Rohrleitung DN50 bei $v_0 = 4$ m/s	75
6.40	Kalibrierung des Modells der Kavitationsblase anhand der Dampfgehaltsverläufe des Gittersensors	76
6.41	Transmissionssignale U_{tr} an der Meßstelle 2 (0.75 m hinter der Klappe) im Vergleich zum Verlauf der rechnerischen Ausbreitung der Kavitationsblase x	77

8.5 Tabellenverzeichnis

3.1	Charakteristische Anlagedaten der Druckstoßanlage in Oberhausen	7
6.1	Realisierte Versuchsvarianten bei den Schnellschlußversuchen	40
6.2	Zusammenstellung der Parameter für die Berechnung der Ausdehnung der Kavitationsblase	55
6.3	Wirkung der Drossel auf den Schließvorgang der Klappe	69

8.6 Zeitlicher Ablauf des Vorhabens

Die Bewilligung des Projekts erfolgte für einen Zeitraum 01.12.1995 - 30.11.1997. Gegenüber der ursprünglichen Planung ergaben sich zeitliche Verschiebungen bei der Projektbearbeitung, die zu einer kostenneutralen Verlängerung bis zum 28.02.1998 führte. Die Verschiebungen hatten die folgende Ursachen:

1. Infolge des technischen Fortschritts während der zweijährigen Zeitspanne zwischen Projektbeantragung und Projektbewilligung und der einjährige Verzug von UMSICHT bei der Errichtung der Druckstoßanlage erforderte eine überarbeitete Meßtechnikkonzeption.
2. Die Entscheidung von UMSICHT, die Druckstoßanlage als Freiluftanlage zu errichten, erforderte eine Ertüchtigung bzw. Neuentwicklung von Sensoren und Meßwertumformer, damit sie unter den veränderten Bedingungen einsetzbar waren.
3. Für den Einbau der Meßwertumformer auf der Rohrbrücke war zusätzlich ein klimatisierter Schrank zu spezifizieren.
4. Für die Übertragung der Daten von den Sensoren zu den Meßwertumformern im Schrank und vom Schrank zu den Auswerterechnern in der ca. 80 m entfernten Meßwarte waren zusätzlich geeignete Datenübertragungseinrichtungen zu konzipieren und installieren.
5. Der Umfang der Meßreihen erforderte einen höheren Einsatz als geplant von Mitarbeitern des FZR vor Ort in Oberhausen.

Diese genannten Einflußfaktoren erforderte:

- eine kostenneutrale Umwidmung von Finanzmitteln und
- eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um drei Monate.

Der tatsächliche zeitliche Ablauf ist nachfolgender grafischen Darstellung zu entnehmen.

