

FZR-203
November 1997

Archiv-Ex.:

H.-M. Prasser, P. Schütz, N. Kossok

**Berührungslose Detektion der Struktur
und Messung ausgewählter Parameter
von Zweiphasenströmungen durch
Mustererkennungsverfahren unter
Verwendung von Ultraschall als
Meßsonde**

Abschlußbericht zum Vorhaben 1500 967

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 1500 967 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Herausgeber:
FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF
Postfach 51 01 19
D-01314 Dresden
Telefon (03 51) 26 00
Telefax (03 51) 2 69 04 61

Als Manuskript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlußbericht		
3a. Titel des Berichts Berührungslose Detektion der Struktur und Messung ausgewählter Parameter von Zweiphasenströmungen durch Mustererkennungsverfahren unter Verwendung von Ultraschall als Meßsonde			
3b. Titel der Publikation			
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Dr. Prasser, Horst-Michael; Schütz, Peter; Dr. Kossok, Norbert		5. Abschlußdatum des Vorhabens Oktober 1996	
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))		6. Veröffentlichungsdatum September 1997	
		7. Form der Publikation Broschüre	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Forschungszentrum Rossendorf e. V. Institut für Sicherheitsforschung Postfach 510119 01314 Dresden		9. Ber.Nr. Durchführende Institution	
		10. Förderkennzeichen *) 1500 967	
		11a. Seitenzahl Bericht 111	
		11b. Seitenzahl Publikation	
		12. Literaturangaben 101	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) 53170 Bonn		14. Tabellen 17	
		15. Abbildungen 59	
		16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)			
18. Kurzfassung Es wird ein Ultraschall-Meßverfahren für Zweiphasenströmungen vorgestellt, das die simultane Messung der Volumenstromdichte der Gas- und der Flüssigphase in einer Rohrleitung ermöglicht. Ein Prototyp wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Nishny Novgorod (Rußland) aufgebaut. Es realisiert einen gepulsten Transmissions- und Reflexionsbetrieb mit Wellenleitersensoren, die auch an heiße Rohrleitungen bis zu 350°C direkt angekoppelt werden können. Kernstück der Meßmethode ist ein Mustererkennungsverfahren, das in bestimmten Volumenstrombereichen nach einer umfangreichen Kalibrierung (Trainingsprozeß) einen Meßfehler von kleiner 10 % besitzt, wenn die thermodynamischen und geometrischen Randbedingungen nahezu konstant bleiben. Durch die Erweiterung der Trainingsmatrizen um einen, die thermodynamischen Eigenschaften determinierenden Parameter (z. B. Temperatur, Druck) kann das Klassifizierungsverfahren auch auf Fälle mit veränderlichen Stoffwerten angewandt werden. Das Mustererkennungsverfahren und die Ultraschalltechnik wurden experimentell optimiert und erprobt. Die Ultraschallsignale wurden außerdem mit Hilfe der Methode des unüberwachten Lernens klassifiziert. Die gefundenen Gruppen von Signalmustern weisen eine deutliche Ähnlichkeit zu bekannten Strömungskarten auf. Es wird gezeigt, daß das Verfahren des unüberwachten Lernens sich für die objektive Aufstellung von Strömungskarten eignet. In einem speziellen Kapitel werden die Ergebnisse von Tests zur Füllstandsmessung in einem Segment der Hauptumwälzleitung von Druckwasserreaktoren vorgestellt			
19. Schlagwörter Ultraschall, Zweiphasenströmung, Mustererkennung			
20. Verlag		21. Preis	

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final report	
3a. Report Title Contactless detection of the structure and selected parameters of a two-phase-flow by pattern recognition based ultrasonic techniques		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Dr. Prasser, Horst-Michael; Schütz, Peter; Dr. Kossok, Norbert		5. End of Project October 1996
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))		6. Publication Date September 1997
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Research Center Rossendorf Inc. Institute for Safety Research PO box 510119 01314 Dresden		7. Form of Publication Booklet
		9. Originator's Report No.
		10. Reference No. 1500 967
		11a. No. of Pages Report 111
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) 53170 Bonn		11b. No. of Pages Publication
		12. No. of References 101
		14. No. of Tables 17
		15. No. of Figures 59
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract <p>An ultrasonic measuring method is presented, which allows to measure the volume flow densities of the gas and the liquid phases in a pipeline. A prototype was developed in co-operation with the Technical University of Nishny Novgorod, Russia. It operates in pulse-echo and in pulse-transmission modes with wave guide sensors, which can be clamped also on hot pipelines up to 350°C. The basis of the measuring method is a pattern recognition technique. In certain regions of flow rates, it determines the volume flow densities with an error of less than 10 %, provided the thermodynamic parameters are almost constant. An extension of the training matrices by adding a thermodynamic parameter (temperature, pressure) allows to apply the classification method for fluids with variable physical properties, too. The pattern recognition and the ultrasonic hardware were experimentally optimised and tested. The ultrasonic signals were also classified by an unsupervised learning procedure. The found clusters show a significant similarity to flow maps known from the literature. It was shown that the method of unsupervised learning can be used for the automatic setup of flow maps. A special chapter is dedicated to the water level measurement in a segment of the main circulation line of nuclear pressurised water reactors.</p>		
19. Keywords ultrasonic, two-phase flow, pattern recognition		
20. Publisher		21. Price

Inhalt	Seite
1 Einleitung	6
2 Grundlagen	8
2.1 Strömungsformen in Rohrleitungen	8
2.2 Anwendung von Ultraschall als deterministisches Verfahren zur Untersuchung von Zweiphasenströmungen	10
2.3 Statistische Verfahren zur Untersuchung von Zweiphasenströmungen - Arbeitshypothese	11
3 Stand der Technik und Schlußfolgerungen	14
4 Versuchsanlagen	19
4.1 Kleine Testschleife	19
4.2 Zweiphasen-Testschleife des Instituts für Sicherheitsforschung	20
4.3 Ultraschall-Meßkette	26
4.3.1 Erfassung charakteristischer Fluktuationssignale mittels Ultraschall	26
4.3.2 Kontinuierliche Durchschallung	27
4.3.3 Gepulster Transmissions- und Echo-Betrieb	30
4.4 Testmatrizen	33
5 Mustererkennung	35
5.1 Prinzip der Bestimmung von Parametern der Zweiphasenströmung durch Mustererkennung	35
5.2 Meßgrößen	37
5.3 Signalfilterung	37
5.4 Untersuchte Merkmalsextraktionsverfahren	38
5.4.1 Allgemeine Kriterien	38
5.4.2 Polares Verfahren (DTE)	39
5.4.3 Lineares Vorhersagemodell (VLN)	40
5.4.4 Fraktales Verfahren (FRC)	40
5.5 Metriken	41
5.6 Test und Gegenüberstellung der verschiedenen Mustererkennungsverfahren	43
5.7 Zusammenfassung der Varianten von untersuchten Mustererkennungsalgorithmen	43

6	Optimierung des Mustererkennungsverfahrens anhand einer Wasser-Luft-Strömung in vertikalen Rohrleitungen	45
6.1	Testdaten	45
6.2	Gegenüberstellung der Mustererkennungsverfahren	45
6.3	Auswirkung der Filterung des primären Meßsignals	48
6.4	Einfluß der Metrik	50
6.5	Einfluß der Ordnung des linearen Vorhersagemodells (VLN)	51
6.6	Abhängigkeit der Erkennungsrate von der Meßzeit und der Anzahl der Trainingsstichproben	52
6.7	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Auswahl des Mustererkennungsverfahrens	53
7	Übergang zu veränderten Randbedingungen	55
7.1	Ergebnisse bei verändertem Rohrlungsdurchmesser	55
7.2	Einfluß der Temperatur des Strömungsmediums	58
7.3	Messung bei veränderlichen Stoffwerten durch Erweiterung der Menge der zugeordneten Strömungsparameter	60
8	Zweiphasenströmung Wasser-Luft in horizontalen Rohrleitungen	62
8.1	Testdaten	62
8.2	Erkennungsraten	62
8.3	Einfluß der Einlaufänge	64
8.4	Luftbetrieb mit erhöhtem Druck bzw. erhöhter Temperatur	65
9	Automatische Aufstellung von Strömungskarten durch unüberwachtes Lernen (Clustering)	66
9.1	Grundlagen	66
9.2	Strömungskarte für den vertikalen Strömungskanal	68
9.3	Abhängigkeit der Erkennungsraten des Mustererkennungsverfahrens mit überwachtem Lernen von der Strömungsform	72
10	Experimente bei Dampftrieb der Zweiphasen-Testschleife	75
10.1	Testdaten	75
10.2	Klassifizierungsergebnisse	75
11	Eignung der Ultraschallverfahren als Störfallinstrumentierung	77
11.1	Aufgabenstellung / Stand der Technik	77
11.2	Höhenstandsmessung mit Hilfe des Impuls-Echo-Verfahrens	78

11.2.1	Methodik der Experimente	78
11.2.2	Einsatz eines Ultraschallprüfkopfes vom Typ K2K	79
11.2.3	Einsatz eines Hochtemperatur-Schallemissionsaufnehmers vom Typ LNA-4	81
11.3	Höhenstandsmessungen mittels Durchschallung und anschließender Mustererkennung	82
11.3.1	Methodik der Experimente	82
11.3.2	Durchschallung mit Schallemissionsaufnehmern vom Typ LNA-4	83
11.4	Zusammenfassung der Untersuchungen zur Höhenstandsmessung	85
12	Zusammenfassung	86
13	Anhang	90
13.1	Literatur	90
13.2	Formelsammlung	101
13.3	Glossar	103
13.4	Bildverzeichnis	104
13.5	Tabellenverzeichnis	108
13.6	Zeitlicher Ablauf des Vorhabens	109

1 Einleitung

Das Projekt zielt auf die Entwicklung von berührungslosen Meßverfahren für die Bestimmung der Parameter einer Zweiphasenströmung, beschränkt auf Flüssigkeits-Gas- bzw. Flüssigkeits-Dampf-Gemische. Die Anwendung von Ultraschall ist attraktiv, da die Ankopplung der Meßgeber (Ultraschallwandler) an die Außenwand der zu überwachenden Rohrleitung möglich ist. Als primäres Meßsignal werden die Gleich- und die Schwankungsanteile der Amplitude des durchgehenden und/oder des reflektierten Ultraschallsignals genutzt.

Die Messung von Phasenanteilen, Blasengeschwindigkeiten und Blasengrößen mit Ultraschall wird bei kleinen Gasanteilen herkömmlicherweise mit Hilfe von Impuls-Echo- oder Doppler-Techniken betrieben. Bei höheren Gasanteilen versagen die Verfahren aber aufgrund der zunehmenden Schwierigkeit der Interpretation der Meßsignale. Deshalb wurde in der vorliegenden Arbeit bewußt auf eine physikalische Interpretation der Ultraschallsignale verzichtet.

Das Vorhaben konzentriert sich deshalb auf die Anwendung der Mustererkennung. In einer Trainingsphase wird ein für diesen Zweck optimiertes Mustererkennungsverfahren mit Ultraschallsignalen angelernt, denen ein Satz von bestimmenden und bekannten Parametern der Zweiphasenströmung zugeordnet ist. Diese Vorgehensweise entspricht der Methode des überwachten Lernens. Die Messung beruht auf der Klassifizierung der für unbekannte Parameter aufgenommenen Ultraschallsignale anhand der angelernten Merkmale. Dabei erfolgt die Zuordnung des gespeicherten Satzes von bestimmenden Parametern zu den identifizierten Signalen. Voruntersuchungen im Rahmen einer Machbarkeitsstudie (Prasser et al. 1994a) hatten ergeben, daß durch diesen Ansatz eine Erweiterung des Anwendungsbereichs von Ultraschall hin zu hohen Volumengasanteilen erreicht wird. Dem Verfahren sind erst dann Grenzen gesetzt, wenn die Transparenz des Meßmediums durch die Gasphase soweit zurückgeht, daß ein signifikantes Ultraschallsignal nicht mehr aufgezeichnet werden kann.

Die Frage nach der Übertragbarkeit von einmal trainierten Mustererkennungssystemen auf Situationen mit veränderten thermodynamischen oder geometrischen Randbedingungen wird anhand umfangreicher Untersuchungen an einer Zweiphasentestschleife im Institut für Sicherheitsforschung des FZR untersucht.

In einem speziellen Kapitel wird der Versuch unternommen, die Detektion des Füllstands an einem Segment einer originalen Hauptkühlmittelleitung eines Kernkraftwerks im Sinn einer Störfallinstrumentierung durchzuführen. Besondere Aufmerksamkeit wird der Untersuchung der Anwendbarkeit von Hochtemperaturlaufnehmern gewidmet, die an die Hauptumwälzleitung bei Betriebsbedingungen ohne Kühlung direkt angekoppelt werden könnten.

Einen weiteren Schwerpunkt stellt die Bestimmung der Strömungsform mit Methoden des unüberwachten Lernens dar (Clustering). Die Klassifizierung von Ultraschallsignalen führt zu strukturierten Gruppen von Merkmalen, die ohne subjektive visuelle Bewertung der Strömungsform gebildet werden. Es wird gezeigt, daß die Topologie der gebildeten Gruppen mit der Struktur klassischer Strömungskarten korrespondiert. Mit dem entwickelten Verfahren ist somit die Auf-

stellung von Strömungskarten ohne das Hinzuziehen empirischer Informationen möglich.

Für die Untersuchungen wurde eine eigens aufgebaute Zweiphasen-Testschleife genutzt, an der in einer vertikalen und einer horizontalen Testsektion ein umfangreicher Bereich von Volumenstromdichten der Gas- und Flüssigphase realisiert werden konnte. Die Schleife kann sowohl im Luft-Wasser- als auch im Dampf-Wasser-Betrieb gefahren werden. Letzteres ist bis zu einem Druck von 2,5 MPa möglich. Dadurch können Fragen der Übertragbarkeit von der Luft-Wasser- auf die Dampf-Wasser-Strömung behandelt werden.

Für die Durchschallung der zu untersuchenden Rohrleitungen wurde zunächst eine im FZR entwickelte Anordnung zur kontinuierlichen Durchschallung benutzt, die auf Hochtemperaturaufnehmern basiert, die von der Einrichtung für Akustische Diagnose und Qualitätssicherung Dresden (EADQ), einer Zweigstelle des Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, entwickelt und hergestellt werden.

Im Zuge der Projektbearbeitung wurde ein zweites Ultraschallsystem erprobt, das von der Universität Nishny Novgorod, Rußland, entwickelt wurde. Dieses System arbeitet nach dem gepulsten Durchschallungsverfahren, liefert zusätzlich Echosignale und verwendet Wellenleitersensoren, die ebenfalls an heiße Rohrleitungen angekoppelt werden können. Hiermit wurden bessere Ergebnisse erzielt als mit der kontinuierlichen Durchschallung. Aus diesem Grund wurde die Hardware aus Nishny Novgorod in enger Kooperation weiterentwickelt. Im Ergebnis liegt ein dreikanaliges, digitales Funktionsmuster einer Signalerfassungseinheit vor, das für praktische Meßaufgaben zur Verfügung steht und im Vergleich zu den beiden anderen Anordnungen die besten Ergebnisse liefert.

Der chronologische Werdegang des Projekts bedingt, daß nicht alle der sehr umfangreichen Meßreihen mit dem gepulsten Verfahren aufgenommen worden sind. Insbesondere für die horizontale Teststrecke liegen nur Datensätze von der kontinuierlichen Durchschallung vor. Auch war bei der Aufstellung der Testmatrix auf eine Überdeckung eines möglichst großen Bereichs von Volumenstromdichten orientiert worden. Wie sich später herausstellte, ist die Mustererkennung in einzelnen Teilbereichen der Volumenstrommatrix besser, in anderen schlechter für die Messung geeignet. In den Gebieten, wo hohe Erkennungsraten vorliegen, wäre eine feinere Aufteilung der Volumenstromdichten wünschenswert, um die Meßgenauigkeit zu verbessern.

Die Gründe für die schlechteren Ergebnisse in Teilen der Volumenstrommatrix sind durch den Übergang zu stärker transienten Strömungsformen begründet, wie Plug- oder Slugströmung. Eine Verbesserung der Effizienz der Mustererkennungsverfahren ist denkbar, wenn von den derzeit verwendeten statistischen Ansätzen stärker auf die Auswertung von einzelnen charakteristischen Ereignissen im Ultraschallsignal übergegangen wird. Diese Schritte müssen weiterführenden Untersuchungen vorbehalten bleiben.

2 Grundlagen

2.1 Strömungsformen in Rohrleitungen

Die Zweiphasenströmung ist durch verschiedene Strömungsformen gekennzeichnet, die sich durch das äußere Erscheinungsbild unterscheiden. Die Zuordnung von Strömungszuständen beruht meist auf einer subjektiven visuellen Beurteilung durch den Beobachter. Die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Strömungsformen orientieren sich an (Huhn, Wolf 1975):

Tabelle 2.1 Mögliche nominelle Bezeichnungen für Hauptformen der Strömung für vertikale und horizontale Strömungskanäle

Vertikaler Strömungskanal	
Blasenströmung (bubble flow)	Die Gasphase liegt verteilt in vielen Blasen in einem kontinuierlichen Flüssigkeitsstrom vor.
Pfropfenströmung (plug flow, auch slug flow)	Das Gas strömt als Pfropfen, die fast den gesamten Rohrquerschnitt ausfüllen. Zwischen den Pfropfen befindet sich die Flüssigkeit, die kleine Blasen enthalten kann.
Schaumströmung (churn flow)	Diese Strömung stellt einen Übergang zwischen der Pfropfen- und der Ringströmung dar. Sie entsteht, wenn die Turbulenz bei der Pfropfenströmung erhöht wird. Die Schaumströmung besteht aus sehr unregelmäßigen großen und vielen kleinen Blasen und hat einen auffallend instabilen Charakter.
Ringströmung (annular flow)	Bei der Ringströmung bewegt sich an der Wand ein Flüssigkeitsfilm. Das Gas strömt mit wesentlich höherer Geschwindigkeit im Kern. Ein Teil der Flüssigkeit wird in Form von Tropfen im Gaskern transportiert.
Tropfenströmung (droplet flow)	Die Tropfenströmung stellt sich nur bei größeren Geschwindigkeiten ein. Das Gas stellt die kontinuierliche Phase dar, die Flüssigkeit liegt in Form von Tropfen vor.
Horizontaler Strömungskanal	
Blasenströmung (bubble flow)	Wie bei der vertikalen Strömung, nur werden die Blasen infolge der Schwerkraft vorwiegend in der Nähe des Scheitelpunkts der Rohrleitung transportiert.
Pfropfenströmung (plug flow)	Das in Pfropfen strömende Gas wird infolge der Schwerkraft vorwiegend im oberen Rohrabschnitt transportiert.
Glatte Schichtströmung (stratified flow)	Beide Phasen sind durch eine glatte Phasengrenzfläche vollständig getrennt. Diese Strömungsform tritt bei kleinen Geschwindigkeiten auf.
Wellenströmung (wavy stratified flow)	Mit Anwachsen der Gasgeschwindigkeit bilden sich Wellen an der Flüssigkeitsoberfläche aus.

Schwallströmung (slug flow)	Bei größeren Gasdurchsätzen erfolgt der Übergang zur Schwallströmungen. Es bilden sich Flüssigkeitswellen (Schwalle) heraus, die den Scheitelpunkt der Rohrleitung erreichen. Die Leitung ist zeitweilig vollständig mit Flüssigkeit gefüllt.
Schaumströmung (churn flow)	Stark turbulente, heterogene Blasenströmung, wie im vertikalen Strömungskanal
Ringströmung (annular flow)	Wie bei der vertikalen Strömung, nur aufgrund der Schwerkraft ist der Flüssigkeitsfilm unregelmäßiger ausgebildet.
Tropfenströmung (droplet flow)	Die gesamte Flüssigkeit wird in Form von Tropfen vom Gas transportiert.

In der Literatur wird das Auftreten der verschiedenen Strömungsformen in Abhängigkeit von bestimmenden Parametern kartiert. Diese graphische Darstellung wird Strömungskarte genannt. In der Literatur werden für den Fall, daß die Stoffwerte nicht variiert werden, häufig die Volumenstromdichten der strömenden Phasen als bestimmende Parameter verwendet (Griffith & Wallis 1961, Dukler & Taitel 1980, Ishii & Mishima 1980, Annunziato 1987). Von anderen Autoren wurde durch Einführung von bezogenen Größen versucht, die Strömungskarten von dem Einfluß der Stoffwerte unabhängig zu machen. Eine Zusammenstellung der wichtigsten verwendeten Parameterkombinationen gibt Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2 Vorschläge für Parameterkombinationen zur Kartierung der Strömungsformen

Abszisse	Ordinate	Vorgeschlagen / Quelle
J_w	J_L	Griffith, Wallis 1961
$\rho_w J_w^2$	$\rho_L J_L^2$	Hewitt, Roberts 1969
J_L / J_w	J_L	Govier, Aziz 1972
$\frac{Fr}{\sqrt{\Lambda}}$	$\sqrt{\frac{\beta}{1-\beta}}$	Oshinowo, Charles 1974
J_w	J_L	Dukler, Taitel 1977
J_w	J_L	Ishii, Mishima 1980
J_w	J_L	Annunziato et al. 1987

2.2 Anwendung von Ultraschall als deterministisches Verfahren zur Untersuchung von Zweiphasenströmungen

Berührungslose deterministische Verfahren, bei denen Ultraschallaufnehmer von außen an die zu untersuchende Rohrleitung angekoppelt werden, arbeiten prinzipiell nach folgenden drei Methoden:

1. Impuls-Echo-Verfahren,
2. Ultraschalldurchschallung und
3. Dopplereffekt.

Mit Hilfe des Impuls-Echo-Verfahrens ist es über die Auswertung des reflektierten Signals möglich, den Aufenthaltsort und die Größe einzelner Blasen zu bestimmen, um so Phasenanteile und Grenzflächen auszumessen. Ein weiteres Anwendungsgebiet des Impuls-Echo-Verfahrens ist die Bestimmung von Filmdicken durch die Auswertung der Laufzeit des an der Phasengrenze reflektierten Schalls.

Das Durchschallungs- oder Transmissionsverfahren wird nach der Ansteuerung des Ultraschallsenders nochmals in gepulstes bzw. Dauerschallverfahren unterteilt. Beim gepulsten Transmissionsverfahren wird ähnlich wie beim Impuls-Echo-Verfahren ein Impuls ausgesandt. Ausgewertet wird hier aber nicht der reflektierte, sondern der durch die Strömung hindurchgehende Schallstrahl. Alternativ dazu kann der Sender auch durch ein sinusförmiges Signal angeregt werden.

Das Ultraschall-Dopplerverfahren wird zur Messung der Blasengeschwindigkeit in Zweiphasenströmungen eingesetzt. Ein Sender emittiert kurze Schallbursts. Aus dem reflektierten Empfangssignal werden anhand der Laufzeit die Blasenorte bestimmt und aus der Frequenzverschiebung der Schallwellen die Blasengeschwindigkeit ermittelt.

Die Ausbreitung von Schall in Flüssigkeiten und Gasen erfolgt in Form von Longitudinalwellen, da elastische Scherkräfte in Fluiden nicht auftreten können. Für Longitudinalwellen werden z.B. in (Chang, Morala 1990) folgende Abhängigkeiten für den Reflexions- (R) und den Transmissionskoeffizienten (T) beim Übergang von einer Phase in die andere (Phase 1 in Phase 2) senkrecht zur Phasengrenzfläche angegeben:

$$R = \frac{I_R}{I_0} = \left[\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right]^2 \quad (2.1)$$

$$T = \frac{I_T}{I_0} = \frac{4\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)^2} \quad (2.2)$$

Hierbei sind ρ_i die Dichte und c die Schallgeschwindigkeit der betrachteten Phase. Das Produkt ρc wird als akustische Impedanz bezeichnet. Diese Stoffwerte für Luft und Wasser (bei 20 °C) sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Tabelle 2.3 Dichten und Schallgeschwindigkeiten von Luft und Wasser bei 20°C

Fluid	Dichte ρ / kg/m ³	Schallgeschwindigkeit c / m/s
Luft	1,20	344
Wasser	998	1495

Aufgrund des großen Dichteunterschiedes zwischen Wasser und Luft bzw. Dampf ist der Anteil der Transmission gering ($< 1\%$) gegenüber dem reflektierten Anteil. Gasanteile, die in den Ultraschallstrahl geraten, reflektieren daher praktisch die gesamte Schallintensität. Der betreffende Anteil wird aus dem Transmissionsanteil ausgeblendet. Die Amplitude des Signals der Durchschallung der gesamten Rohrleitung nimmt um einen entsprechenden Betrag ab.

Diese Aussage trifft allerdings nur zu, wenn die Wellenlänge des Schalls wesentlich kleiner als die charakteristische Blasengröße ist. Gelangt die Wellenlänge in die Größenordnung der Abmessungen der Blasen, so kann die Beugung an den Blasenrändern nicht mehr vernachlässigt werden. Während bei kleinen Wellenlängen (entsprechend Frequenzen ab ca. 1 MHz) mit zunehmendem Volumengasanteil ein Zustand erreicht wird, bei dem das Transmissionssignal immer mehr abgeschattet wird, bewirkt die Beugung bei größeren Wellenlängen, daß zumindest noch kleinere Anteile der Sendeintensität den Empfänger erreichen.

Aus dieser grundsätzlichen Betrachtung ergibt sich, daß für die Transmission mit Frequenzen im Bereich unterhalb von 1 MHz gearbeitet werden sollte. Bei 300 kHz beträgt die Wellenlänge in Wasser (bei Normalbedingungen) z.B. ca. 5 mm und liegt somit in der Größenordnung größerer Blasen.

Zusätzlich oder alternativ zum Transmissionssignal bietet sich die Aufzeichnung des reflektierten Ultraschallsignals an. Durch die unterschiedliche Blasengrößen wird der Schallstrahl in charakteristischer Weise reflektiert, so daß das fluktuierende Reflexionssignal für ein Mustererkennungsverfahren grundsätzlich ebenso geeignet ist. Um auswertbare Signale zu erhalten, ist für den Reflexionsbetrieb ein Frequenzbereich >1 MHz günstig, in dem die oben beschriebene Beugung des Schallstrahles an kleinen Blasen nur noch eine untergeordnete Bedeutung hat.

2.3 Statistische Verfahren zur Untersuchung von Zweiphasenströmungen - Arbeitshypothese

Zur Identifizierung wichtiger Parameter einer Zweiphasenströmung wird im Rahmen dieses Vorhabens ein auf den Methoden der Mustererkennung basierender Lösungsansatz gewählt. Dieser wird auf eindimensionale Ultraschallsignale angewendet, um charakteristische Strömungsmuster als Repräsentanten der zu identifizierenden Prozeßgrößen zu erkennen und diese als Referenzen in einer Wissensbasis abzuspeichern. Dabei wird vorausgesetzt, daß eindeutige Relationen zwischen den zwei Kategorien von Größen, nämlich den zu identifizierenden Parametern auf der einen Seite und den Ultraschallsignalmustern auf der anderen Seite, existieren. Die Grundidee dieses Ansatzes zeigt Bild 2.1.

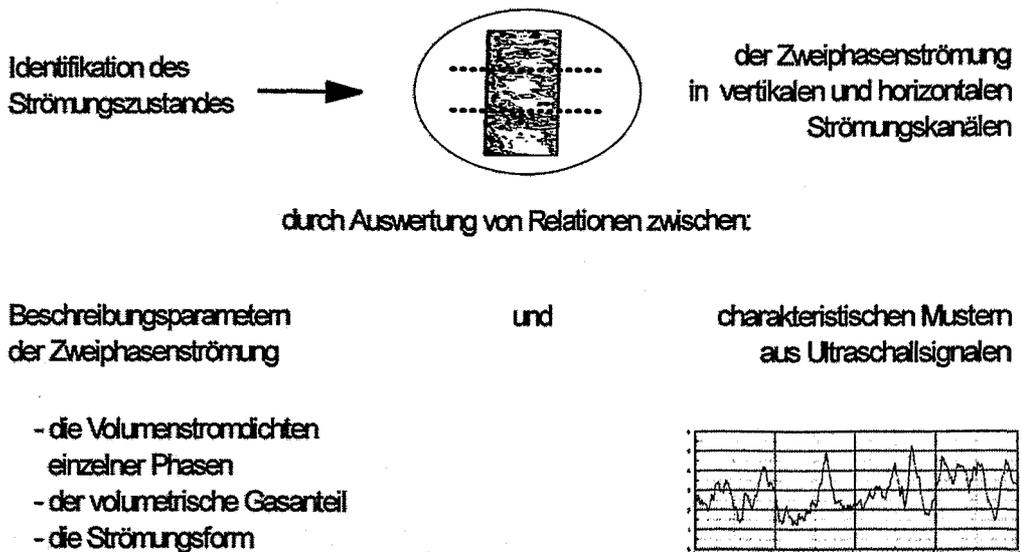


Bild 2.1 Grundidee der Messung der Parameter in Zweiphasenströmungen mit Hilfe von Mustererkennungsverfahren

Der meßtechnische Ansatz stützt sich auf die Arbeitshypothese, daß der zu beobachtende Strömungsprozeß durch eine endliche Anzahl unabhängiger Prozeßgrößen eindeutig bestimmt ist. Für den Fall, daß die geometrischen Randbedingungen und die thermodynamischen Stoffwerte identisch sind, wird die Zweiphasenströmung in einer Rohrleitung durch die Volumenstromdichten der beiden strömenden Phasen bestimmt. Die Hypothese geht davon aus, daß sich nach einer bestimmten endlichen Einlaufänge eine reproduzierbare Strömungsform (im Sinn der vorliegenden instationären räumlich-zeitlichen Phasenverteilung) einstellt, die von der Art und Weise des Zustandekommens der Zweiphasenströmung unabhängig ist.

Die instationäre Phasenverteilung am Meßort führt zu einer charakteristischen Modulation des Ultraschallstrahls sowohl bei der Durchschallung als auch bei der Reflexion des Schalls. Nach Wandlung durch die jeweilige Ultraschall-Meßkette erhält man somit je nach räumlicher und zeitlicher Auflösung des Detektors im Empfangssignal eine Abbildung der Strömungsstruktur, die nach der vorausgesetzten Hypothese reproduzierbar sein muß. Das daraus resultierende Identifikationssystem (Bild 2.2) besteht aus

1. einem Ultraschallmeßsystem (Durchschallung oder Impuls-Echo) und
2. einer Mustererkennungseinheit.

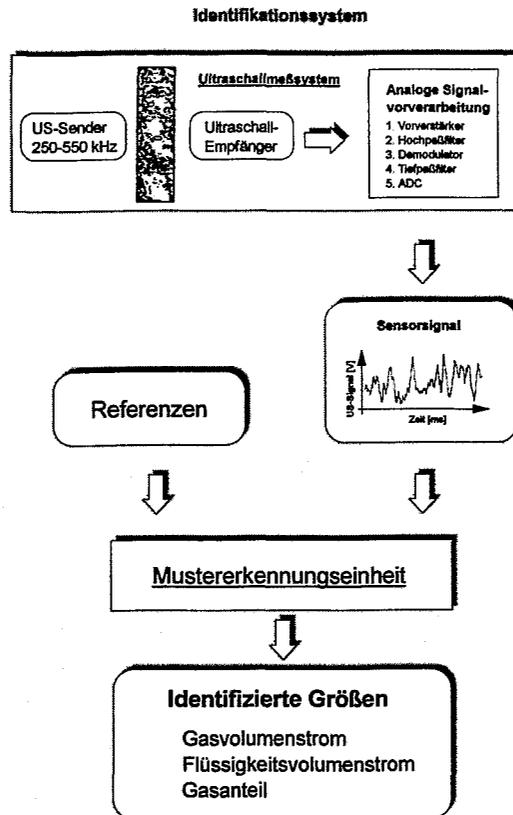


Bild 2.2 Grundsätzlicher Aufbau des Meßsystems zur simultanen Identifizierung der Volumenströme von Gas und Flüssigkeit. Als Referenzmuster dienen die charakteristischen Signalmuster aus den Ultraschallsignalen, die als Vorwissen der Mustererkennungseinheit zur Verfügung stehen

3 Stand der Technik und Schlußfolgerungen

Der eigentliche Beginn einer systematischen statistisch/stochastischen Analyse von Detektorsignalen einer Zweiphasenströmungen ist auf Jones & Zuber (1975) zurückzuführen. Mit einem linearisierten Röntgen-Meßsystem als Gasgehalts-Detektor in einem rechteckigen Strömungskanal gelang ihnen der Nachweis, daß die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Röntgenfluktuationen eine Identifizierung von drei hauptsächlichen Strömungsmustern erlaubt: Blasen-, Schwall- und Ringströmung. Zusätzliche Informationen über das Zeitverhalten der Strömung lieferte die Spektraldichtefunktion. Angewandt wurde dieses Konzept auf die Daten einer adiabaten Luft-Wasser-Strömung im Geschwindigkeitsbereich bis 31 m/s. Danach folgten zahlreiche Arbeiten, initiiert teilweise durch die rapide Entwicklung der EDV, durch die eine stochastische Signalanalyse im großen Maßstab möglich wurde, und teilweise durch die neuen Anforderungen an die Meßtechnik unter dem Gesichtspunkt der Zuverlässigkeit technischer Anlagen auf dem Energiesektor. Einen pointierten Überblick über entwickelte Verfahren bis 1982 stellten Rouhani & Sohal (1983) in ihrem Übersichtsaufsatz dar.

Vince & Lahey (1982) nutzen eine Röntgenapparatur, um eine senkrechte Rohrleitung zu durchstrahlen. Mit Hilfe hochintensiver Röntgenquellen gelang es, die Genauigkeit der Gasgehaltsmessung gegenüber Jones & Zuber (1975) erheblich zu steigern. Die Durchstrahlung erfolgt über mehrere Sehnen, so daß eine Information über die Phasenverteilung im Querschnitt des Kanals erhalten wird. Die Zeitverläufe der Gasgehaltssignale werden statistisch ausgewertet. Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsdichte- und der Spektraldichtefunktion werden objektive Kriterien für die Unterscheidung von verschiedenen Strömungsformen aufgestellt. Die Kriterien wurden durch Vergleich mit visuellen Beobachtungen festgelegt, was der Methode des überwachten Lernens entspricht.

Wesser et al. (1983) entwickelten ein Verfahren, das nach einer Kalibrierung ohne eingehende Kenntnis des Übertragungsverhaltens der Detektoren durch Auswertung stochastischer Charakteristika der Signale eine Zuordnung von unbekanntem Strömungszuständen in die versuchsstandsspezifische Strömungskarte erlaubt. Dabei werden die Signale eines Röntgendensitometers und von Leitfähigkeitssonden ausgewertet.

Albrecht et al. (1984) extrahierten aus Neutronenrauschsignalen ein binäres und vier metrische Merkmale, die in einem Vektor zusammengefaßt wurden. Die Ausprägung jedes Merkmals wird in einem Koordinatensystem in Abhängigkeit der Leerrohrgeschwindigkeit dargestellt. Zur Identifikation von unbekanntem Mustern werden diese fünf Merkmale herangezogen, wobei als Eingabeparameter die Leerrohrgeschwindigkeiten der Phasen benutzt wurden.

Matsui (1988) nutzt die Fluktuationen von Differenzdruckaufnehmern, um quantitative Kriterien zur Unterscheidung von Strömungsformen zu erhalten. Es werden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen berechnet und daraus verschiedene statistische Momente (Mittelwert, Streuung, Schiefe, Exzeß) abgeleitet. Die Zuordnung der charakteristischen Varianten der Gestalt der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und die Kriterien für die Momente erfolgt durch Vergleich mit visuellen Beobachtungen. Es

werden Stickstoff-Wasser-Strömungen in vertikalen, horizontalen und geneigten Kanälen untersucht.

Franca et al. (1991) nutzten ebenfalls die Fluktuationen von Differenzdrucksignalen, die neben der Berechnung von Wahrscheinlichkeitsdichten und Leistungsspektren mit Methoden der Fraktaltheorie charakterisiert werden. Es wird die fraktale Dimension des Attraktors der Signale im n-dimensionalen Pseudo-Phasenraum berechnet und zur Klassifizierung genutzt.

Die folgende Tabelle faßt die wichtigsten Literaturstellen hinsichtlich der Beschreibungsparameter, des Meßprinzips und der Merkmale für die Charakterisierung der Strömungsform zusammen.

Tabelle 3.1 Einige Arbeiten zur Identifikation der Strömungsform anhand der statistischen Analyse der Meßsignale

Autor	Jahr	Beschreibungsparameter	Meßprinzip/Sensor	Merkmal
Vince, Lahey	1982	mittlerer volumetrischer Gasgehalt	Röntgenstrahlung	Histogramm, Spektrum, statistische Momente
Tutu	1982	Druckdifferenz	Differenzdruckaufnehmer	Histogramm, statistische Momente
Moore, Turtley	1983	statischer Druck, Druckdifferenz, lokaler Gasgehalt	Druckaufnehmer, optische Nadelsonde	Histogramm, Spektrum, statistische Momente
Wesser et al.	1983	mittlerer volumetrischer Gasgehalt, Druckdifferenz	Röntgen, Leitfähigkeitssonden	Histogramm, Spektrum, statistische Kennwerte
Ohlmer et al.	1984	mittlerer volumetrischer und lokaler Gasgehalt, Druckfluktuationen	Röntgen, Leitfähigkeitssonden, Differenzdruckaufnehmer	Histogramm, Spektrum, Momente
Lipsett et al.	1986	volumetrischer Gasgehalt	Gamma-Densitometer	Histogramm, Spektrum, statistische Momente
Sekoguchi et al.	1987	mittlerer volumetrischer Gasgehalt	Leitfähigkeitssonde	autoregressives Modell
Matsui	1988	Druckdifferenz	Differenzdruckaufnehmer	Leistungsspektrum, Momente
Serizawa et al.	1991	mittlerer Gasgehalt, Geschwindigkeiten	elektromagnetisches Flowmeter	Histogramm
Franca et al.	1991	Druckdifferenz	Druckaufnehmer	Histogramm
Spindler, Hahne	1995	lokaler Gasgehalt	optische Nadelsonden	Spektrum, statistische Kennwerte

Die Literatur enthält auch eine Reihe von Beispielen für die Anwendungen von Ultraschall zur Untersuchung von Zweiphasenströmungen. Es werden sowohl Verfahren zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit und von Geschwindigkeitsprofilen, als auch von Höhenständen und des Void-Anteils beschrieben.

Hauptsächlich wird dabei das Impuls-Echo-Verfahren angewandt. Aus der Laufzeit des Ultraschalls wird der Aufenthaltsort einzelner Blasen bestimmt. Die Intensität des reflektierten Signals wird zur Ermittlung von Blasengrößen verwandt. Durch Kombination gelingt die Messung von Phasenanteilen und Phasengrenzflächen (Morala, Chang 1986), (Chang, Morala 1990), (Matikainen et al. 1986), (Morala et al. 1983).

Über den Einsatz des Ultraschall-Transmissionsverfahrens zur Bestimmung der Dichte bzw. des Void-Anteils von Zweiphasenströmungen wird von Chang et al. (1983) berichtet. Das Verfahren ist sehr einfach und robust und gestattet trotzdem die Verfolgung transienter Phänomene. Nach Meinung der Autoren ist das Verfahren auch für Anwendungen an großvolumigen Behältern und unter Bedingungen hohen Druckes und hoher Temperatur geeignet, bei denen andere Verfahren versagen. Die Grenzen des Transmissionsverfahren liegen in der Beschränkung auf eine Blasenströmung, wobei experimentelle Ergebnisse nur bis zu einem volumetrischen Gasanteil von ca. 10 % vorliegen.

Eine Arbeit zur Schichtdickenmessung mit Hilfe des Impuls-Echo-Verfahrens wird in (Verberk 1991) vorgestellt. Das Verfahren ist für einen Einsatz an Komponenten des Primärkreislaufs von Kernreaktoren ausgelegt. Durch Auswertung der Laufzeit des an der Phasengrenzfläche reflektierten Schalls werden Schichtdicken der Flüssigkeit und Gasanteile gemessen sowie das Strömungsregime bestimmt.

Eine ausgereifte Anwendung des Ultraschall-Dopplerverfahrens wird ausführlich in (Takeda 1987) und (Takeda 1991) beschrieben. Der Ultraschall wird schräg in das zu untersuchende Medium in Strömungsrichtung eingeleitet, damit die Dopplerverschiebung reflektierter Wellenzüge möglichst groß ist. Der Ultraschallwandler arbeitet als Sender und Empfänger, gesendet werden kurze Schallbursts. Aus dem Empfangssignal werden anhand der Laufzeit die Blasenorte bestimmt und aus der Frequenzverschiebung der Schallwellen die Blasengeschwindigkeit ermittelt. Da die Gasblasen ein sehr hohes Reflexionsvermögen für Ultraschallwellen aufweisen, bietet sich die Anwendung des Verfahrens für Flüssigkeits-Gas-Gemische an. Ebenso wie bei einfacheren Impuls-Echo-Verfahren ist der Einsatz jedoch auf kleine Gasanteile begrenzt. Hauptursache ist die starke Abnahme der Reichweite durch Abschattungseffekte bei steigendem Void-Anteil (bzw. steigender Blasenzahl) und insbesondere die hohe Dämpfung in der Gasphase. In diesem Zusammenhang wirkt zusätzlich erschwerend, daß das Meßsignal die Wegstrecke zweimal durchlaufen muß.

Nakamura & Kondo (1997) messen das Geschwindigkeitsprofil und den momentanen Flüssigkeitsspiegel in einer Schicht- bzw. Wellenströmung mit einem Ultraschall-Geschwindigkeitsmonitor. Der Einfluß von Mehrfachreflexionen zwischen Flüssigkeitsoberfläche und Kanalwandung wurde durch eine schräge Einschallung und durch ein Dämpfungsmedium (Gummi) reduziert. Eine weitere Anwendung des Doppler-Effekts für eine Blasen- und eine Schichtströmung wird von Aritomi (1997) beschrieben. Die Auswertung der Dopplerverschiebung wird mit einer Laufzeitmes-

sung kombiniert, so daß ebenfalls Geschwindigkeitsprofile erhalten werden können. Ein Meßgerät zur Bestimmung der Dicke des Flüssigkeitsfilms an einem vertikalen, axial umströmten Zylinder (Modell eines nuklearen Brennstabs), werden von Serizawa et al. (1997) vorgestellt. Es folgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Literatur:

Tabelle 3.2 Einige Arbeiten zur Anwendung von Ultraschall zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten, Gasanteilen und/oder Blasengrößen

Autor	Jahr	Meßgrößen	Meßprinzip/ Sensor
Lattimer et al.	1979	Geschwindigkeit und Wachstumsgeschwindigkeit einer Blase in flüssigem Natrium	Impuls-Echo-Verfahren
Rogers, Miller	1982	Flüssigkeitsspiegel, Temperatur und Dichte	Impuls-Echo-Verfahren in einem Wellenleiter
Morala et al.	1983	Blasengröße	Impuls-Echo-Verfahren
Chang et al.	1983	Gasanteil	Transmissionsverfahren
Xu, Leonard	1985	Blasengröße	gepulstes Transmissionsverfahren
Matikainen et al.	1986	Blasengröße	Impuls-Echo-Verfahren
Morala, Chang	1986	Gasanteil	Impuls-Echo-Verfahren
Hilgert, Hofmann	1986	Geschwindigkeitsprofil	Doppler-Verfahren
Peters et al.	1986	Strömungsgeschwindigkeit	Impuls-Echo-Verfahren und Kreuzkorrelation
Takeda	1987	Geschwindigkeitsprofil in Quecksilber	Doppler-Verfahren
Melnikov et al.	1987	Gasanteil	Impuls-Echo-Verfahren und gepulstes Transmissionsverfahren
Xu	1988	Gasgeschwindigkeit	Impuls-Echo-Verfahren und Kreuzkorrelation
Jossinet	1989	Höhenstand	Impuls-Echo-Verfahren und gepulstes Transmissionsverfahren
Chang, Morala	1990	Blasengeschwindigkeit	Impuls-Echo-Verfahren
Verberk	1991	Filmdicke und Gasanteil	Impuls-Echo-Verfahren
Whitehouse, Eghbali	1991	Gasvolumenstrom und Flüssigkeitsvolumenstrom	Impuls-Echo-Verfahren und Gamma-Densitometer
Takeda	1991	Geschwindigkeitsprofil	Doppler-Verfahren
Hofmann, Rockstroh	1993	Blasengröße	Impuls-Echo-Verfahren
Nakamura, Kondo	1997	Schichtdicken, Geschwindigkeitsprofil	Doppler-Verfahren, Ultraschall-Laufzeitmessung
Aritomi	1997	Schichtdicken, Geschwindigkeitsprofil	Doppler-Verfahren, Ultraschall-Laufzeitmessung
Serizawa et al.	1997	Filmdicke	Ultraschall-Laufzeit

Zusammenfassend wird festgestellt, daß in der recherchierten Literatur keine non-intrusiven Methoden vertreten sind, die Messungen bei größeren Void-Anteilen gestatten. Die speziellen Voraussetzungen, an die alle in der Literatur vorgestellten Verfahren gebunden sind, führen zu einer starken Einschränkung ihrer praktischen Anwendbarkeit. Hiervon ausgehend wurde im Rahmen des Vorhabens die Realisierbarkeit von Meßverfahren untersucht, die auf der Anwendung von Methoden der Mustererkennung zur Auswertung von Transmissions- und/oder Impuls-Echo-Signalen basieren.

Die bisherigen Ansätze zur Objektivierung der Einteilung von Strömungszuständen in Gebiete mit charakteristischer Strömungsform benötigen eine a-priori-Information über die vorliegende Strömungsform in der Phase der Aufstellung der quantitativen Kriterien. Deshalb wurde in einem speziellen Kapitel der vorliegenden Arbeit der Versuch unternommen, die Methode des nichtüberwachten Lernens hierfür anzuwenden. Ziel ist die Aufstellung von Strömungskarten unter Ausschluß des subjektiven Einflusses eines Beobachters.

4 Versuchsanlagen

4.1 Kleine Testschleife

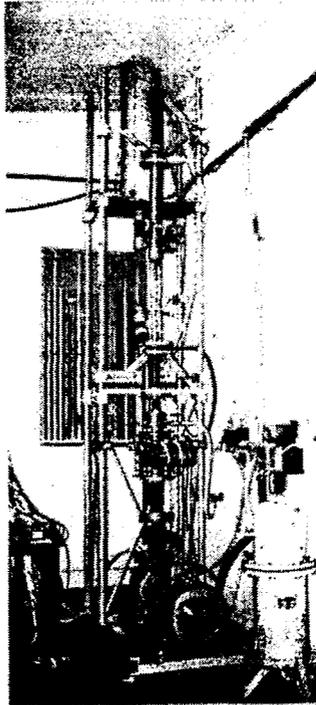
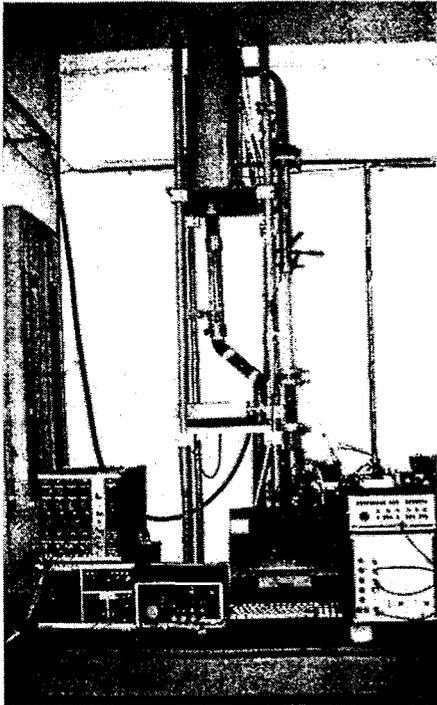


Bild 4.1 Ansicht der kleinen Testschleife

Für die im Rahmen des Vorläuferprojekts durchgeführte Machbarkeitsstudie zur Anwendung von Mustererkennungsverfahren zur Bestimmung von Parametern einer Zweiphasenströmung wurde eine kleine Testschleife (Bild 4.1) aufgebaut, die die Erzeugung einer definierten Wasser-Luft-Strömung in einer senkrechten Rohrleitung erlaubte. Es handelt sich um einen Vorläufer der Testschleife, die im Rahmen des vorliegenden Projekts aufgebaut und genutzt wurde. Die kleine Testanlage wurde 1994 demontiert.

Die Anlage war zur Atmosphäre hin offen, d.h. die Experimente beschränkten sich auf Atmosphärendruck. Die maximal erreichbaren Volumenströme lagen bei ca. 20 m³/h für Wasser und bei ca. 12 m³/h für Luft. Der Innendurchmesser der senkrechten Testsektion betrug 51,2 mm. Daraus ergeben sich Volumenstromdichten von max. 3 m/s für Wasser und 1,7 m/s für Luft.

Ein Schema der Schleife zeigt Bild 4.2. Die Schleife wurde mit Leitungswasser aus dem Hausnetz betrieben. Die Wasserströmung wurde von einer Kreiselpumpe erzeugt, die sich am tiefsten Punkt der Schleife befand. Von dort strömte das Wasser über ein Ventil zur Einstellung des Volumenstroms, einen Strömungsgleichrichter und einen induktiven Durchflußmesser in die Testsektion, an deren Anfang sich die Einspeisevorrichtung für die Luft befand.

Die Luft wurde über 12 Kanülen eingepert, deren Enden in Strömungsrichtung abgewinkelt waren und sich etwa gleichmäßig über dem Strömungsquerschnitt verteilten. Der Innendurchmesser der einzelnen Kanülen betrug 0,8 mm. Die Luft stammte aus dem Preßluftnetz des Forschungszentrums, sie wurde über einen Kerzenfilter geleitet.

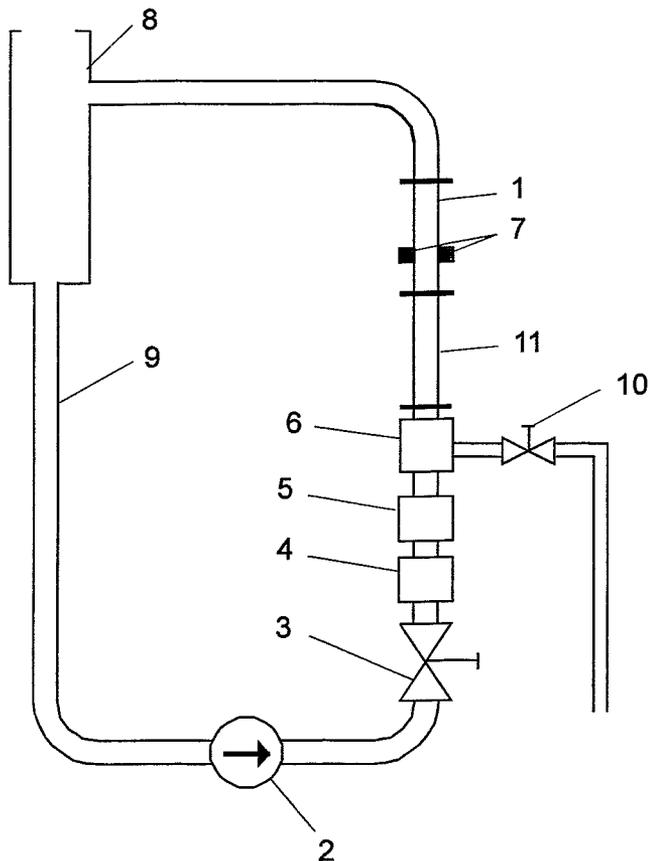


Bild 4.2 Prinzipdarstellung der kleinen Testschleife

1 - Testkanal, 2 - Umwälzpumpe, 3 - Ventil, 4 - Strömungsgleichrichter, 5 - Durchflußmesser für Wasser, 6 - Einperlvorrichtung, 7 - Ultraschallaufnehmer, 8 - Zyklonseparator, 9 - Sinkleitung, 10 - Durchflußmesser und -regler für Luft, 11 - Glassegment zur Strömungsbeobachtung

Die Einstellung des Luftvolumenstroms wurde mit Durchflußreglern der Fa. MKS mit integrierter Hitzdrahtmeßstelle vorgenommen. Zur Gewährleistung der erforderlichen Genauigkeit über dem gesamten Einstellbereich waren zwei separate Regler mit Endwerten von 5 und 200 l/min vorhanden, zwischen denen in Abhängigkeit vom einzustellenden Wert umgeschaltet wurde.

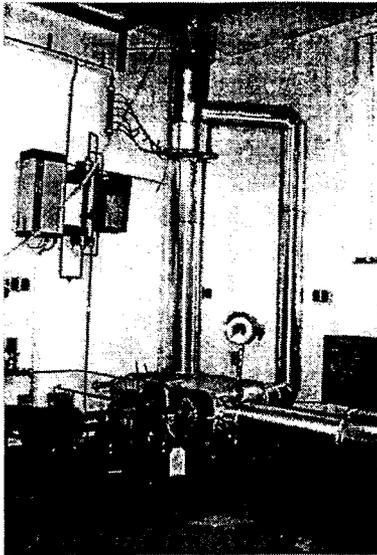
Das Zweiphasengemisch strömte, von der Einspeisevorrichtung kommend, über die vertikale Teststrecke in einen Zyklonseparator, in dem die Luft vom Wasser getrennt wurde. Das Wasser gelangte anschließend über eine Sinkleitung zurück zum Ansaugstutzen der Pumpe, die Luft wurde in die Atmosphäre entlassen.

Ein längerer Pumpenbetrieb bewirkte die Aufheizung des zirkulierenden Wassers. Dieser Effekt wurde ausgenutzt, um Experimente bei erhöhter Temperatur durchzuführen. Die maximale Temperatur betrug 80 °C. Die Wassertemperatur wurde mit einem Pt-100-Meßfühler überwacht.

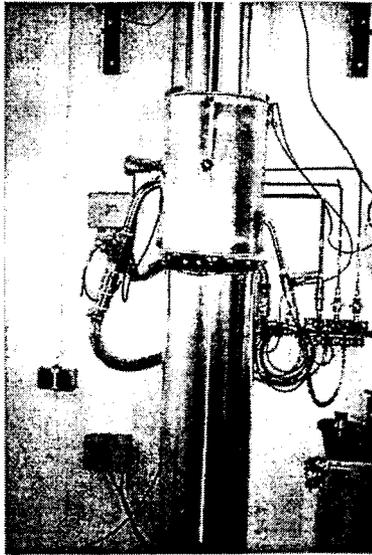
Die Ultraschallwandler waren am oberen Ende der Teststrecke angebracht. Durch Einbau von transparenten Segmenten aus Glas konnte die Strömung auch visuell beobachtet werden. Die zur Verfügung stehende Einlauflänge von der Einspeisevorrichtung bis zu den Wandlern betrug 1 m, das entspricht ca. 20 L/D.

4.2 Zweiphasen-Testschleife des Instituts für Sicherheitsforschung

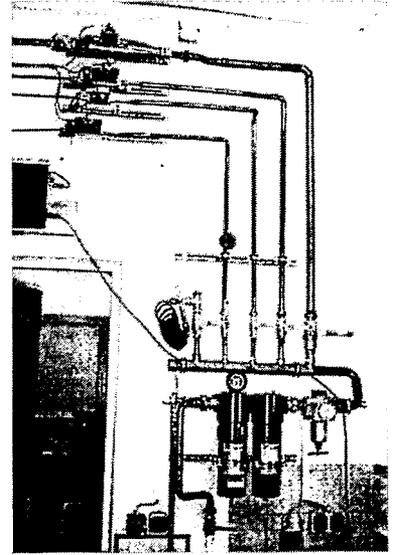
Für die Untersuchungen im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde die Zweiphasen-Testschleife des Instituts für Sicherheitsforschung genutzt. Teile der Anlage wurden im Rahmen des Projekts aufgebaut. Die neue Anlage entspricht in ihrem grundlegenden Aufbau der kleinen Testschleife (s. Bilder 4.3 und 4.4).



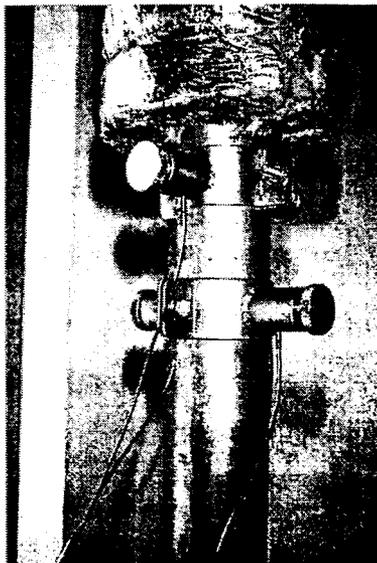
Hauptumwälzpumpe mit E-Motor, Kühlrohr und Bypassleitung



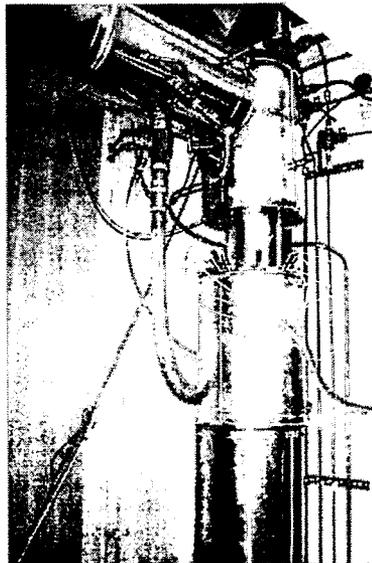
Luftinpeilverrichtung im unteren Plenum der Schleife



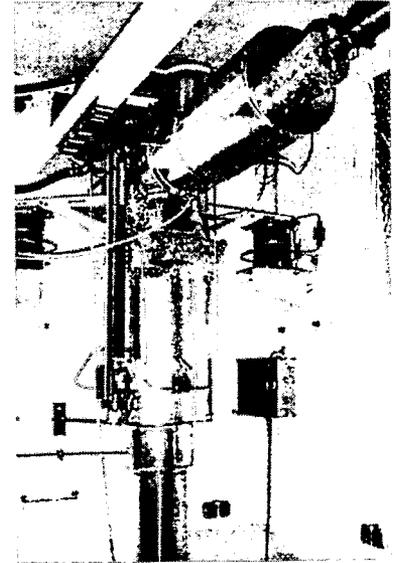
Luftharfe



Vertikale Testsektion mit 4 Ultraschallwandlern des Typs LNA-4



Nadelsondenkamm im vertikalen Bereich und Luftinpehlung im oberen Plenum der Schleife



Horizontale Testsektion mit Separator

Bild 4.3 Teilansichten der Zweiphasen-Testschleife des Instituts für Sicherheitsforschung

Die wesentlichen Erweiterungen und Verbesserungen gegenüber der alten Schleife lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die gesamte Schleife ist einheitlich aus austenitischem, rostfreien Stahl aufgebaut und wird mit vollentsalztem Wasser (Deionat) hoher Qualität betrieben. Die typische Leitfähigkeit des Wassers beträgt, auch nach längerem Schleifenbetrieb, $0,5 \mu\text{S/cm}$. Zur Versorgung mit Deionat ist die Anlage mit einem Ionenaustauschfilter, einem Lagerbehälter sowie einer Füllpumpe versehen.
- Die Schleife kann sowohl mit Wasser-Luft- als auch mit Wasser-Dampf-Gemisch betrieben werden. Der Dampf wird durch eine elektrische Heizung mit einer Leistung von 20 kW erzeugt. Der Dampfbetrieb kann bis zu einem Druck von 2,5 MPa und einer Temperatur von 225 °C durchgeführt werden. Die Druckerhöhung geschieht durch Aufbau eines Dampfpolsters im Separator. Bei Luftbetrieb ist eine Druckerhöhung bis zum Druckniveau der Preßluftleitung des Institutsnetzes (etwa 0,5 MPa) möglich.
- Die vertikale Testsektion wurde deutlich verlängert, so daß jetzt Einlaufängen von 70 - 80 L/D realisiert werden können. Es ist eine horizontale Testsektion von 2 m Länge hinzugekommen. Der Innendurchmesser der Testsektionen beträgt 51,2 mm. Der Durchmesser der vertikalen Testsektion kann durch Austauschen von Rohrleitungssegmenten auf 29 bzw. 81 mm variiert werden.
- Die Durchflußregelung für das Wasser wurde durch Drehzahlregelung der Pumpe über einen Frequenzumrichter, durch eine Rezirkulationsleitung mit Dreiwegeventil und durch eine genauere Durchflußmeßstelle, die nach dem Ultraschall-Laufzeitverfahren arbeitet, wesentlich verbessert.
- Der Bereich der realisierbaren Volumenstromdichten wurde auf 0 - 4 m/s für Wasser und 0 - 12 m/s für Luft (bezogen auf 51,2 mm Innendurchmesser) erweitert. Hierfür wurden zwei weitere Luftdurchflußregler erforderlich, die einen Meßbereich von 50 und 1500 l/min besitzen. Es sind Einspeisevorrichtungen in der vertikalen und der horizontalen Testsektion vorhanden. Jede dieser Vorrichtungen verfügt über folgende Einspeisemöglichkeiten:
 - a) 19 gleichmäßig über dem Rohrschnitt verteilte Kanülen mit einem Durchmesser von jeweils 0,8 mm
 - b) 60 gleichmäßig über dem Umfang verteilte Wandanbohrungen mit einem Durchmesser von jeweils 0,5 mm
 - c) 8 gleichmäßig über dem Umfang verteilte Wandanbohrungen mit einem Durchmesser von jeweils 4 mm
- Bei Dampfbetrieb beträgt die maximal erreichbare Volumenstromdichte des Dampfs 2 m/s. Bei Erhöhung des Systemdrucks geht die Volumenstromdichte zurück.
- Die Schleife ist standardmäßig mit einem Feld von 8 nadelförmigen Leitfähigkeitssonden zur Messung der radialen Gasgehaltsverteilung am Ende der vertikalen Testsektion ausgestattet.

- Die Schleife wird vollständig von einem PC aus gesteuert und geregelt. Es ist möglich, ganze Versuchsprogramme automatisch abzufahren.
- Die Schleife ist aus einzelnen, austauschbaren Rohrsegmenten modular aufgebaut, so daß Veränderungen leicht durchgeführt werden können. Spezialflansche garantieren ein versatzfreies Verbinden der Rohrleitungssegmente.

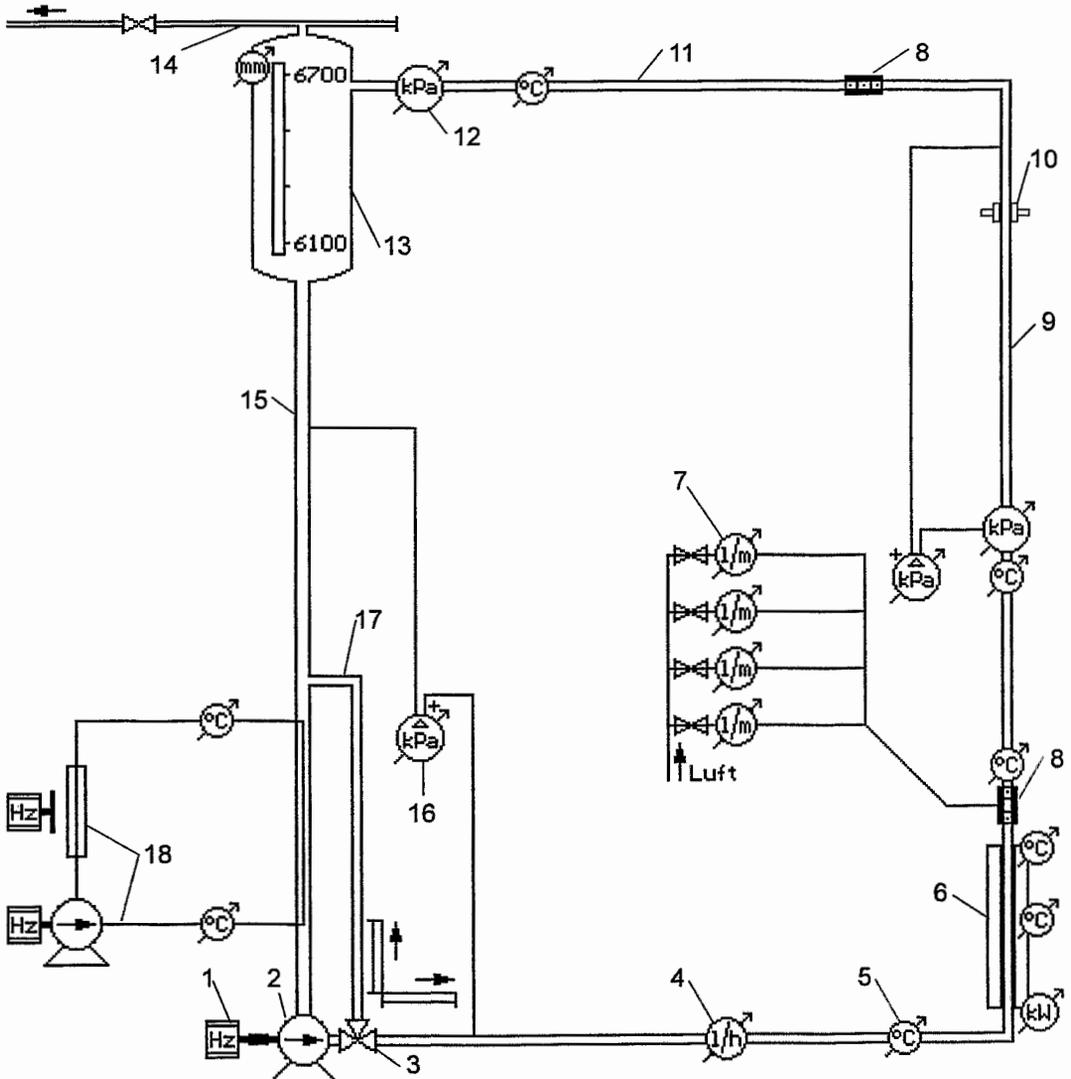


Bild 4.4 Prinzipdarstellung der Zweiphasen-Testschleife des Instituts für Sicherheitsforschung

1 - drehzahlregelbarer Pumpenmotor, 2 - Umwälzpumpe, 3 - Dreiwegeventil, 4 - Durchflußmesser für Wasser, 5 - Temperaturmeßstelle, 6 - elektrische Heizung, 7 - Durchflußmesser und -regler für Luft, 8 - Einperlvorrichtung, 9 - vertikaler Testkanal, 10 - Ultraschallaufnehmer, 11 - horizontaler Testkanal, 12 - Druckmeßstelle, 13 - Separator, 14 - Abluft-/Abdampfleitung mit Sicherheitsventil, 16 - Sinkleitung, 17 - Rezirkulationsleitung, 18 - Kühlkreislauf

Die wichtigsten Parameter der Schleife sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

Tabelle 4.1 Zusammenfassung der wichtigsten Parameter der Zweiphasen-Testschleife

Nr.	Größe	Maßeinheit	Wert		
1	Innendurchmesser der Teststrecken	mm	29	51,2	81
2	Volumenstromdichte Wasser, J_W	m/s	0 - 12	0 - 4	0 - 1,6
3	Volumenstromdichte Luft, J_L	m/s	0 - 38	0 - 12	0 - 4,8
4	Dampfmassestromdichte, G_D	kg/(m ² s)	0 - 15	0 - 4,8	0 - 1,9
5	Betriebsdruck	MPa	0,1 - 2,5		
6	Betriebstemperatur	°C	20 - 225		
7	Heizleistung	kW	0 - 20		

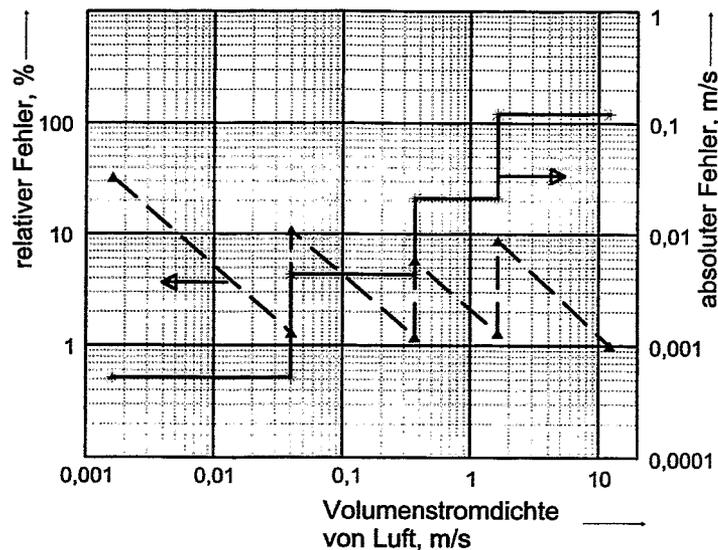


Bild 4.5 Gerätefehler bei der Messung des Luftvolumenstroms

Die Gerätefehler der Volumenstromregelung beim Wasser-Luft-Betrieb sind in den Bildern 4.5 und 4.6 dargestellt. Durch die Untergliederung der Regelung in vier Bereiche kann der Luftvolumenstrom ab einer Leerrohrgeschwindigkeit von 0,005 m/s über den gesamten Bereich bis 12 m/s (bei Innendurchmesser 51,2 mm) mit einem Fehler kleiner 10 %, bezogen auf den jeweiligen Meßwert, eingestellt werden. Der Fehler jedes einzelnen Durchflußreglers beträgt hierbei ca. 1 % vom Endwert des jeweiligen Bereichs.

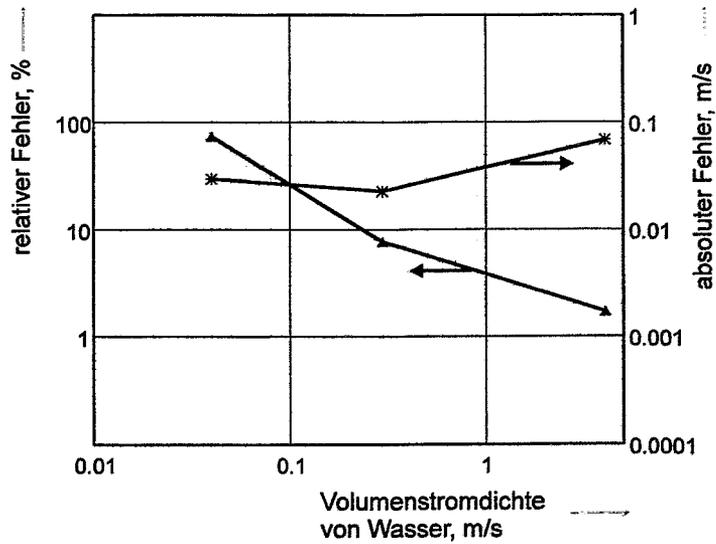


Bild 4.6 Gerätefehler bei der Messung des Wasservolumenstromes

Der Absolutfehler der Volumenstromdichte von Wasser beträgt 0,02 - 0,03 m/s im Bereich von 0,04 - 0,5 m/s, bei höheren Volumenstromdichten bleibt er stets unter 6 % vom jeweiligen Meßwert. Das entspricht im gesamten Meßbereich einem Fehler von weniger als 2 %, bezogen auf den Endwert von 4 m/s.

4.3 Ultraschall-Meßkette

4.3.1 Erfassung charakteristischer Fluktuationssignale mittels Ultraschall

Die Aufgabe der Ultraschallmeßtechnik besteht in der Bereitstellung von Signalverläufen, die durch die Zweiphasenströmung in der Rohrleitung in charakteristischer Weise moduliert sind und sich dadurch als Eingangssignal für Mustererkennungsverfahren eignen. Hierzu wird Ultraschall aus einem Wandler in die Rohrleitung eingeleitet und durch einen zweiten Wandler, der auf der gegenüberliegenden Seite angeordnet ist, empfangen (Transmissionsverfahren). Der empfangene Schall wird durch die zeitlich wechselnde Verteilung von Gaspartikeln innerhalb der Strömung amplitudenmoduliert. Nach einer Demodulation steht ein Signal zur Verfügung, das eine eindeutige, wenngleich a-priori unbekannte Information über den Strömungszustand beinhaltet.

Eine zweite Möglichkeit besteht in der Aufnahme des aus der Zweiphasenströmung reflektierten Ultraschalls durch den gleichen Wandler. Diese Variante ist nur im Impulsbetrieb realisierbar, während der Transmissionsbetrieb sowohl im Impuls- als auch im Dauerschallbetrieb möglich ist.

Die Voruntersuchungen zur Machbarkeitsstudie haben gezeigt, daß eine schmalbandige kontinuierliche Durchschallung auch dann zu einer starken Modulation des Empfangssignals führt, wenn nur eine einphasige Wasserströmung vorliegt. Dieser Effekt beruht auf einer Vielzahl akustischer Resonanzen im System Aufnehmer-Rohrleitung-Meßmedium. Diese Resonanzen verschieben sich im Frequenzbereich infolge geringer Temperatur- und Geschwindigkeitsschwankungen und verursachen die Amplitudenmodulation infolge der Änderung der relativen Lage von Sendefrequenz und Resonanzfrequenzen. Die Schwankungen überlagern das Nutzsignal, das durch die zeitliche Veränderung der Phasengrenzfläche hervorgerufen wird, wodurch der Signal-Rausch-Abstand stark abnimmt.

Zur Unterdrückung dieses Effekts hat sich bei kontinuierlicher Durchschallung eine breitbandige Anregung durch Wobbelung der Sendefrequenz bewährt. Die Wirksamkeit dieser Methode wurde in (Prasser et al. 1994a) beschrieben. Das Empfängersignal wird mit einer Zeitkonstante gemittelt, die größer oder gleich der Wobbelperiode ist. Die Amplitudenmodulation durch Verschiebung der akustischen Resonanzen wird unterdrückt, da die Sendefrequenz in jedem Wobbelzyklus den Bereich der Resonanzen durchläuft und dadurch die Resonanzen erfaßt, auch wenn die Lage derselben sich ändert.

Beim Impulsbetrieb können Störungen dadurch vermindert werden, daß der Effektivwert des Durchschallungssignals in einem bestimmten Zeitfenster nach der impulsförmigen Anregung des Sendewandlers bestimmt wird. Das Fenster ist unter Berücksichtigung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls im System Wandler-Rohrleitung-Meßmedium so zu wählen, daß im wesentlichen nur der Direktschall vom Sender erfaßt wird. Weitere nach Mehrfachreflexionen eintreffende Signalanteile werden hingegen ausgeblendet. Die Resonanzen äußern sich bei impulsförmiger Anregung erst durch später eintreffende Signalanteile, die außerhalb des Zeitfensters liegen. Diese Methode ist auch beim Impuls-Echo-Verfahren anwendbar. Im folgenden werden beide Möglichkeiten näher betrachtet und die Meßketten, die im weiteren Verwendung fanden, vorgestellt.

4.3.2 Kontinuierliche Durchschallung

Die kontinuierliche Durchschallung wurde mit breitbandigen Schallemissionsaufnehmern vom Typ LNA-4 (Hersteller: Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Einrichtung für Akustische Diagnose und Qualitätssicherung (EADQ), Dresden) durchgeführt. Es handelt sich um Hochtemperaturaufnehmer auf der Basis von Lithium-Niobat, die bis zu einer Temperatur von 550 °C eingesetzt werden können. Die hohe maximale Arbeitstemperatur ist vorteilhaft bei der direkten Ankopplung der Wandler an eine heiße Rohrleitung.

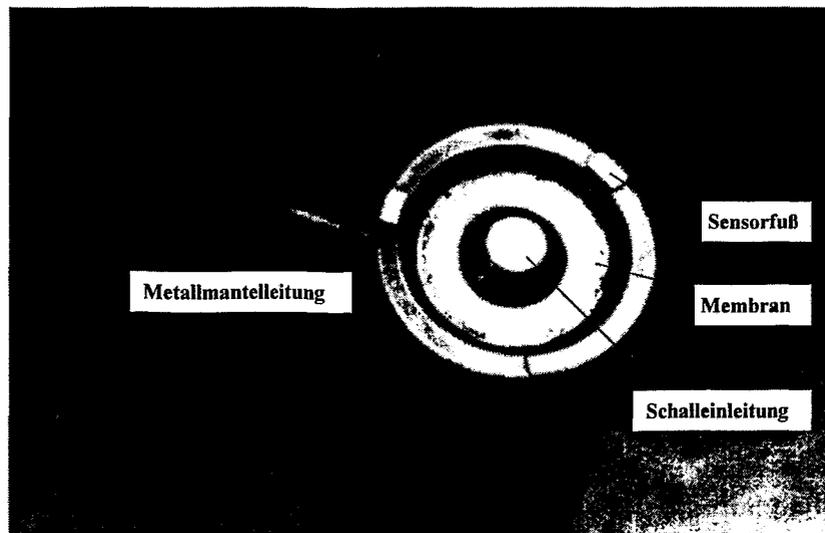


Bild 4.7 Schallemissionsaufnehmer vom Typ LNA-4

Die Sensoren (Bild 4.7) werden von außen an die Rohrleitung des jeweiligen Testsegments angekoppelt (Bild 4.8). Die Rohrleitung besteht aus austenitischem Stahl der Marke 1.4541 und weist eine Wandstärke von 2,9 mm auf. Die Auflage der Sensoren wird von einem kleinen Dreifuß gebildet, in dessen Zentrum sich die Ankoppelfläche befindet, die um einen definierten Betrag über die Ebene der Füße hinausragt. Der Aufnehmer muß an eine ebene Oberfläche derart angepreßt werden, daß alle drei Füße die Oberfläche berühren. Wenn dies der Fall ist, liegt an der Ankoppelfläche eine definierte Anpreßkraft vor, die sich aus der elastischen Deformation der Bodenplatte des Aufnehmers ergibt. In die Oberfläche der Rohrsegmente, an die die Aufnehmer angekoppelt werden sollten, wurden auf jeweils gegenüberliegenden Seiten ebene Ankoppelflächen gefräst, um die beschriebene Art der zu realisieren. Zur sicheren Ankopplung wurde das Ultraschall-Koppelmittel ZG5 der Fa. Krautkrämer GmbH & Co., Hürth verwendet.

Die Aufnehmer arbeiten im Frequenzbereich bis etwa 1 MHz. Für die breitbandige Anregung wurde ein Wobbeln im Frequenzbereich von 65 bis 620 kHz gewählt. Dieser Frequenzbereich wurde empirisch bestimmt, indem versucht wurde, eine möglichst gute Unterdrückung der Signalschwankungen zu erreichen, die bei vollständig mit Wasser gefüllter Rohrleitung auftreten.

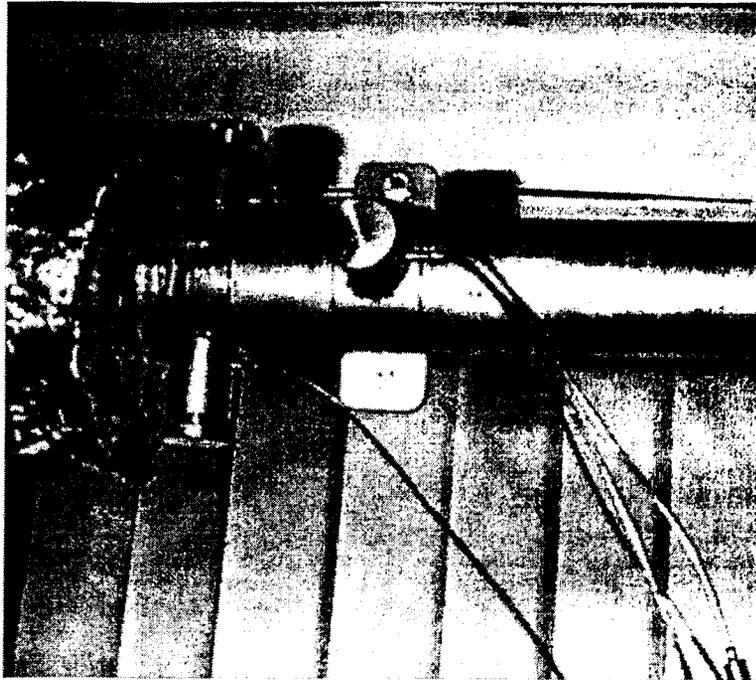


Bild 4.8 Ankopplung der Sensoren vom Typ LNA-4 an die horizontale Teststrecke

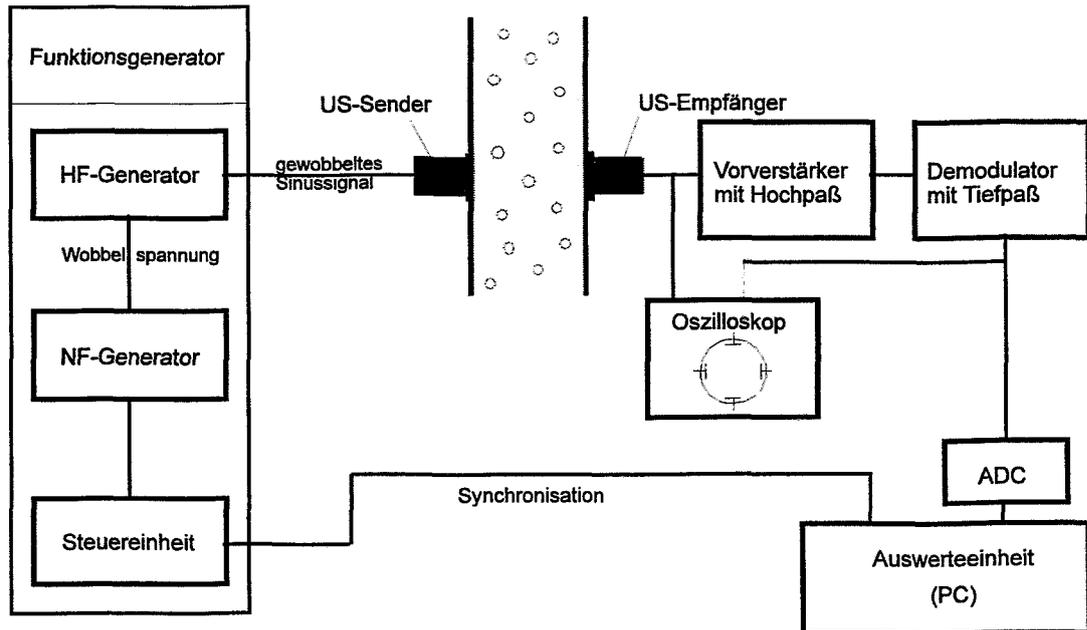
Die Schaltung für das kontinuierliche Transmissionsverfahren ist in Bild 4.9 schematisch wiedergegeben. Ein HF-Generator erregt den als Sender arbeitenden ersten Aufnehmer. Der Generator verfügt über die Möglichkeit, eine Frequenzmodulation zu erzeugen, was zur Wobbelung des Sendesignals genutzt wurde. Es wurde mit der maximal einstellbaren Wobbelfrequenz von 1 kHz gearbeitet.

Das Empfangssignal wird verstärkt und danach amplitudendemoduliert. Die Demodulatorschaltung besteht aus einer Zweiweggleichrichtung und einem nachgeschalteten RC-Glied der Zeitkonstante von 10 ms. Das demodulierte Signal ist das dann weiter auszuwertende primäre Meßsignal. Der Gleichanteil mißt integral die Durchlässigkeit der Zweiphasenströmung für das Sendesignal; der Wechselanteil erfaßt die stochastischen Anteile des vorbeiströmenden Zweiphasengemischs.

Aus der maximalen Strömungsgeschwindigkeit des Wassers in der Versuchsanlage von 4 m/s und einer mittleren Breite des "Beobachtungsraumes" der Aufnehmer von 15 mm ergibt sich eine höchste Signalfrequenz von 300 Hz, die dicht oberhalb der Grenzfrequenz von 160 Hz des RC-Gliedes liegt und auf vertretbare 6 dB Signaldämpfung führt. Die Taktfrequenz des ADC von 1 kHz ist an die maximale Signalfrequenz angepaßt.

Das demodulierte Signal wird zur weiteren Verarbeitung digitalisiert. Hierbei ist das beschriebene RC-Glied des Demodulators das einzige Tiefpaßfilter der Meßkette, das Aliasing-Effekte ausschließen könnte. Rechnerisch werden an dem ADC anliegende Frequenzen erst oberhalb von ca. 330 kHz vollständig unterdrückt; Aliasing-Effekte sind aber bei der ADC-Taktfrequenz von 1 kHz bereits bei Signalfrequenzen oberhalb 500 Hz zu erwarten, die aber, wie oben dargelegt, im Meßsignal nicht mehr auftreten. Wohl aber enthält das Frequenzspektrum der Sendeseite von der modulierenden Zeitfunktion her (geringe) 1 kHz-Anteile und zugehörige nächste

Oberwellen. Hinzu kommen weitere weniger gut definierte Beiträge (z.B. Aufnehmer- und Koppelresonanzen, Schallreflexionen) der Versuchsanordnung, die sich mit jedem Modulationsdurchlauf konstant wiederholen und deshalb ebenfalls ein Linienspektrum mit einer Grundfrequenz von 1 kHz aufweisen. Diese modulationssynchronen Beiträge liefern keine Aliasing-Fehler, da der ADC mit der modulierenden Dreiecksspannung synchronisiert ist.



Gerät	Hersteller	Charakteristika
Ultraschallsensoren LNA-4	Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Einrichtung für Akustische Diagnose und Qualitätssicherung (EADQ), Dresden	Schallemissionsaufnehmer, Resonanzfrequenz bei ca. 200 kHz
Funktionsgenerator TOE 7704	Toelner Electronic Instrumente GmbH	1 MHz ... 12 MHz (Sinus, Dreieck, Rechteck, Impuls, TTL), 10 mV _{SS} ... 30 V _{SS} , wobbeltbar mit Perioden 1 ms ... 1000 s
Oszilloskop Combiscope PM 3331	Fluke Corporation	Analog- und Digitalbetrieb, 2-kanalig, Periode 50 ns/T ... 500 ms/T, Verstärkung 2 mV/T ... 10 V/T
Vorverstärker mit Hochpaß	ZfK Rossendorf	Verstärkung 40 dB oder 60 dB, Eingang symmetrisch oder unsymmetrisch, Hochpaß bei 100 kHz
Demodulator mit Tiefpaß	ZfK Rossendorf	4-kanalig, Verstärkung in 1 dB-Stufen schaltbar zwischen 0 dB und 49 dB, Tiefpaß bei 100 Hz
ADC PICO-100	Pico Technology Ltd.	2-kanalig, 12 Bit, U = ± 200 mV ... ± 20 V
PC	verschiedene	Pentium 120 MHz

Bild 4.9 Blockschaltbild der Ultraschall-Meßkette bei Verwendung der Schallemissionsaufnehmer vom Typ LNA-4

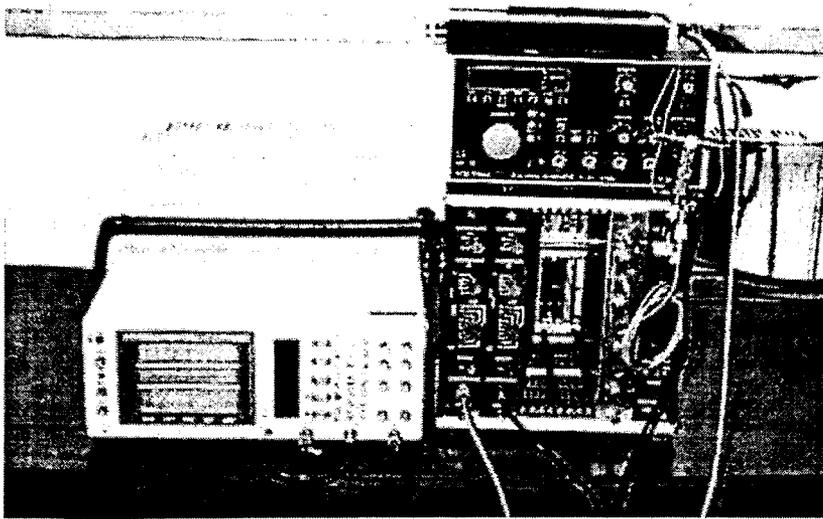


Bild 4.10 Geräteapparatur für die Messungen mit den Schallemissionsaufnehmern vom Typ LNA-4

Einflüsse der modulationssynchronen Beiträge auf die Amplitude des Empfangssignals sind dagegen nicht auszuschließen. Ein modulationssynchroner Signalanteil wird nach Demodulation und modulationssynchroner AD-Umsetzung als Gleichanteil bewertet. Ein veränderter Gleichspannungsanteil (verursacht z.B. durch Drift von Aufnehmerparametern, veränderter

Dämpfung der Aufnehmerkabel oder veränderter Generatorspannung) wurde in den hier durchgeführten Versuchsreihen dadurch eliminiert, daß zu Beginn jeder Versuchsreihe eine Nullmessung ohne Wasserbewegung und ohne Blasenanteil durchgeführt wurde. Auf den Gleichanteil dieser Nullmessung wurden die Gleichanteile der folgenden Meßläufe bei der rechnerischen Auswertung normiert.

4.3.3 Gepulster Transmissions- und Echo-Betrieb

Für das gepulste Verfahren wurde ein Ultraschallgerät benutzt, das von der TU Ni-

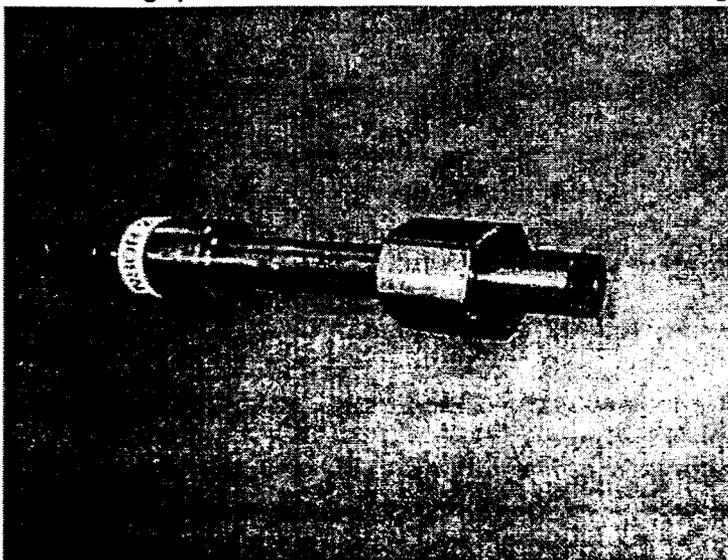


Bild 4.11 Wellenleitersensor

shny Novgorod, Arbeitsgruppe von Prof. Melnikov, aufgebaut worden ist (Melnikov, Nigmatulin 1994). Bei den Sensoren handelt es sich um schmalbandige Wandler, die über Wellenleiter an die Rohrleitung angekoppelt werden (Bilder 4.11 und 4.12). Die Piezokristalle sind selbst nicht hochtemperaturfest, durch die Wellenleiter ist das Gerät jedoch trotzdem an heiße Rohrleitungen ankopplbar. Die Ultraschallelektronik liefert zwei demodulierte Ausgangssignale: Die Amplitudenverläufe des Transmissions- und des Reflexionssignals.

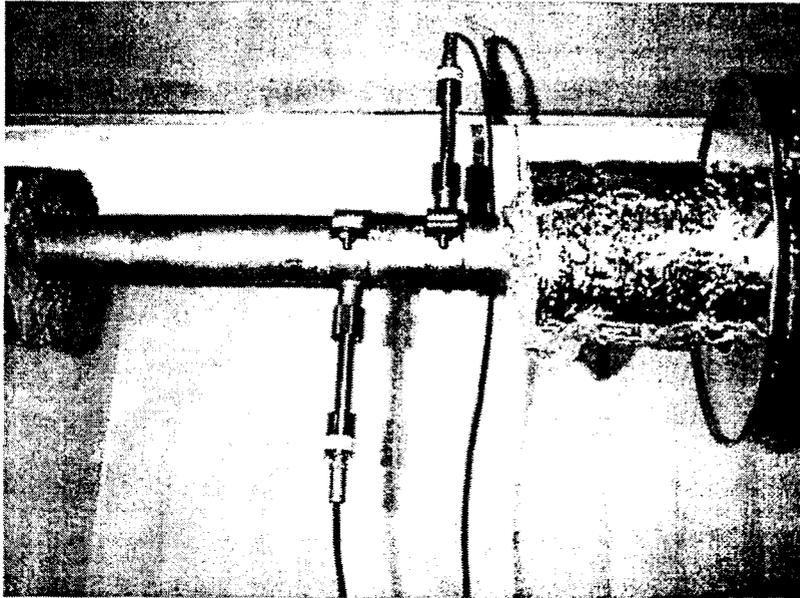


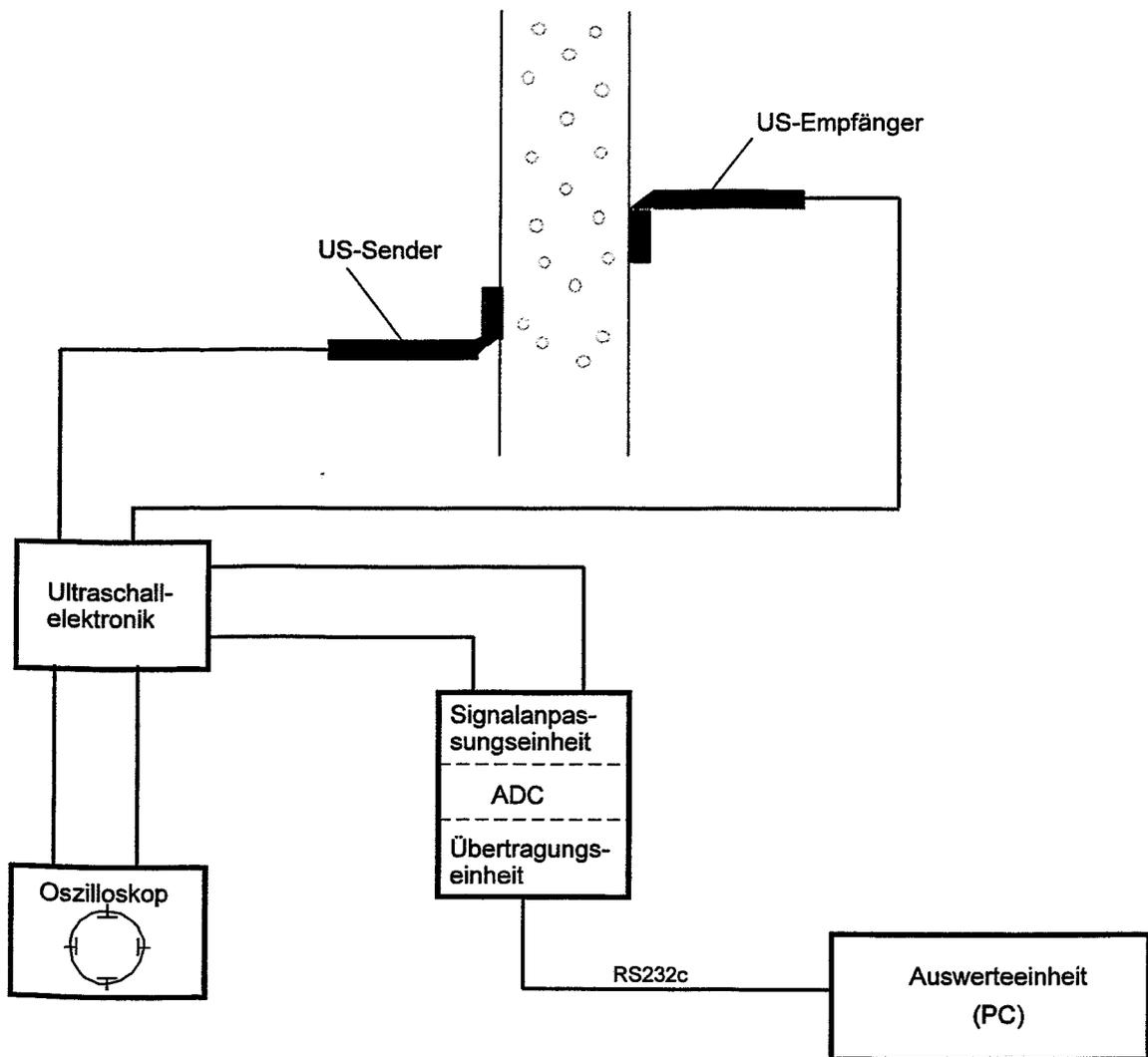
Bild 4.12: Ankopplung der Wellleitersensoren an die horizontale Teststrecke

Die Wellenleiter verfügen über eine besondere Art der Ankopplung, die eine hohe Effektivität bei gleichzeitiger Unterdrückung von Wandechos gewährleistet. Das an die Außenwand der Rohrleitung angepreßte Ende des Wellenleiters ist um 90° in axialer Richtung abgewinkelt (Bild 4.13). Der Piezokristall erzeugt eine Longitudinalwelle, die am 90° -Winkel ihre Richtung ebenfalls um 90° ändert. Durch die seitliche Ankopplung an die Rohrwandung

wird eine Scherwelle auf die Wandung übertragen, die eine longitudinale Ultraschallwelle im Meßmedium erzeugt, welche im Winkel von 45° abgestrahlt wird. Der umgekehrte Vorgang findet am Empfängerwandler auf der gegenüberliegenden Seite der Rohrleitung bzw. am als Empfänger geschalteten Sender während der Aufnahme des reflektierten Anteils statt. Echos aus der Rohrwandung treten durch die schräge Einschallung mit einem axialen Versatz auf, der verhindert, daß sie vom jeweiligen Empfänger wahrgenommen werden.

Mehrfachreflexionen sowie die Resonanzschwingungen des durch den Sendeimpuls angeregten Systems aus Gebern, Rohrleitung und Meßmedium werden durch eine Zeitfensterung des Empfangssignals unterdrückt. Hierzu wird das gleichgerichtete Empfangssignal innerhalb eines einstellbaren Zeitfensters integriert. Für den Transmissions- und der Echobetrieb kann die Lage der Zeitfenster individuell festgelegt werden. Die Länge der Zeitfenster beträgt $12 \mu\text{s}$ und ist fest eingestellt. Die Verzögerung nach dem Sendeimpuls wird auf die jeweilige Rohrleitung und das Meßmedium abgestimmt. Die Einstellung ist manuell vorzunehmen, wobei die Verzögerung so gewählt wird, daß das direkte Transmissions- bzw. Reflexionspeak innerhalb des Zeitfensters liegt.

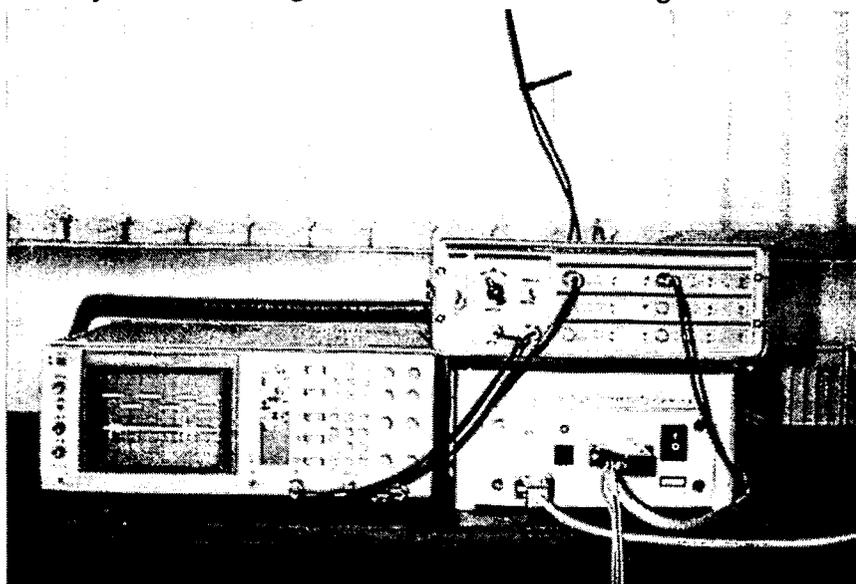
Neben den analogen Ausgangssignalen werden vom Ultraschallgerät die beiden Strobe-Signale für die Zeitfensterungen ausgegeben. Die Signalerfassung erfolgte zunächst mit einem zweikanaligen ADC der Fa. Pico Technology Ltd., der über das Printer-Port an den Datenerfassungs-PC angeschlossen war. Der Prototyp des Ultraschallgerätes besaß eine Pulsfolgefrequenz von 600 Hz, die gleichzeitig die Abtastrate darstellt, da jeder Ultraschallimpuls je einen Wert der primären Meßsignale für Transmission und Reflexion liefert.



Gerät	Hersteller	Charakteristika
Wellenleiter-sensoren	Nishny Novgorod Uni-versität (Rußland)	versetzte Ankopplung, Schalleinleitung und Schal-lempfang über L-Zungen, Schwingfrequenz 780 kHz
Ultraschall-elektronik	Nishny Novgorod Universität (Rußland)	Impulsgenerierung, 3 * 2-kanalige Verarbeitung der Empfangssignale (Echo und Transmission), Zeitfen-sterung, Pulsfolgefrequenz 3 kHz
ADC	Burr-Brown	Typ ADS 7803, 12 Bit, 8,5 µs Umsetzzeit, 4-kanalig, U = 0 V ... 4 V
Signalanpassungs- und -übertragungs-einheit	Forschungszentrum Rossendorf	Einkartenrechner (motorola 68340, 1 MByte RAM, 25 MHz), zum Zwischenspeichern der Signalverläufe, RS232c-Interface
Oszilloskop Com-biscope PM 3331	Fluke Corporation	Analog- und Digitalbetrieb, 2-kanalig, Periode 50 ns/T ... 500 ms/T, Verstärkung 2 mV/T ... 10 V/T
PC	verschiedene	Pentium 120 MHz

Bild 4.13 Schematische Darstellung der Ultraschall-Meßkette mit Wellenleiter-sensoren

Im Zuge der weiteren Entwicklung wurde ein verbessertes Gerät (Bilder 4.13 und 4.14) aufgebaut, das über eine Pulsfolgefrequenz von 3 kHz verfügt. Die Signalerfassung wurde ebenfalls verbessert. Sie erfolgt jetzt mit einem Einkartenrechner, der mit einem Baustein zur AD-Wandlung ausgestattet ist. Die Strobe-Signale dienen der Synchronisierung zwischen dem Ultraschallgerät und dem Einkartenrechner. Die



digitalisierten Signale werden über ein RS232c-Interface mit einer Datenrate von 115,2 kBaud an einen Datenerfassungs-PC weitergeleitet. Der Einkartenrechner kann auch mit Mustererkennungssoftware geladen werden, so daß die Klassifizierung der Signale bereits hier durchgeführt werden kann.

Bild 4.14: Geräteapparatur für die Messungen mit den Wellenleitersensoren

4.4 Testmatrizen

An der Zweiphasen-Testschleife wurden zwei Typen von Experimenten durchgeführt: (1) Versuche mit Luftspeisung und (2) Versuche mit Dampfproduktion. Die für die Erprobung der Mustererkennungsverfahren notwendigen Testdaten wurden auf der Grundlage von Testmatrizen ermittelt. Bei den Luft-Wasser-Experimenten wurden die beiden Volumenströme vorgegeben. Der Volumenstrom des Wassers wurde mit Hilfe der Pumpendrehzahlregelung und dem Dreiwegeventil, das den Bypass freigibt, gesteuert und mit dem Ultraschall-Durchflußmesser überwacht. Die Einstellwerte für die Volumenströme von Wasser bzw. Luft entstammen den folgenden Reihen:

Tabelle 4.2 Einstellwerte für die Luft-Wasser-Versuche

V_w , l/h	0	300	475	754	1194	1893	3000
	4755	7536	11943	18929	30000		
V_L , l/min	0	0.3	0.5	0.8	1.2	1.9	2.9
	4.5	7.1	11.1	17.3	27.1	42.3	66.0
	103.2	161.2	251.8	393.4	614.6	960.1	1500.0

Bei der Aufnahme der Testsignale wurden nacheinander jeweils alle Kombinationen der beiden Volumenströme eingestellt. Insgesamt ergeben sich, die Nullwerte ausgeklammert, 220 Testpunkte. Die Werte sind so gewählt, daß sich in logarithmischer

Darstellung eine gleichmäßige Aufteilung des Gesamtbereichs ergibt. Die resultierenden Volumenstromdichten für Luft und Wasser in einer Rohrleitung von 51,2 mm Durchmesser sind im folgenden Bild 4.15 gezeigt:

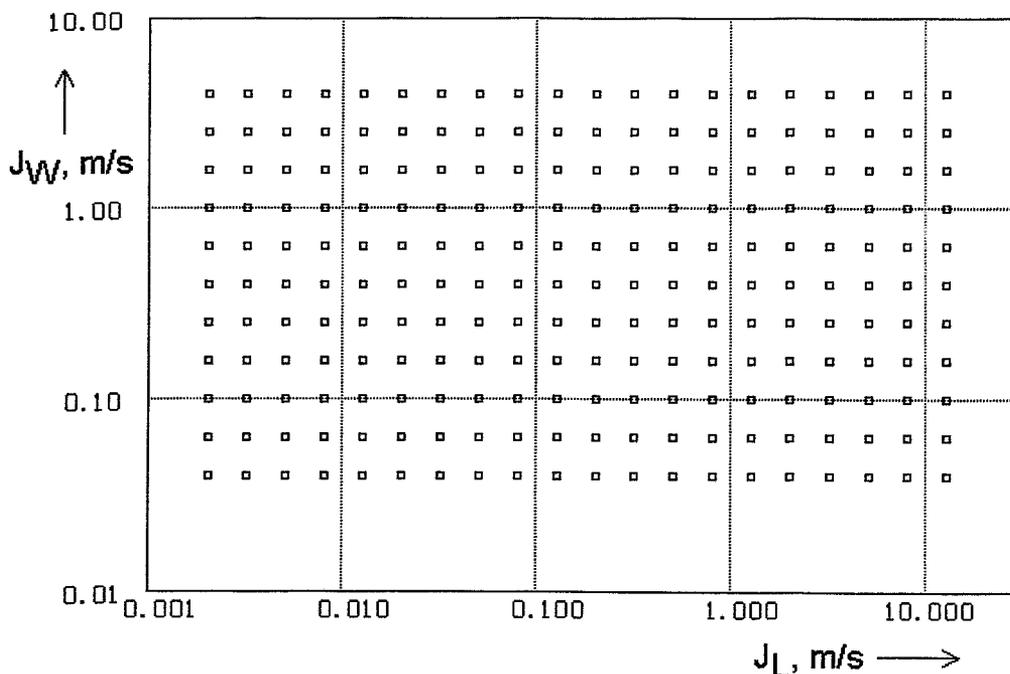


Bild 4.15 Testmatrix für die Luft-Wasser-Versuche

Die Experimente bei Dampftrieb wurden realisiert, indem eine bestimmte Heizleistung P_{el} und der Wasservolumenstrom vorgegeben wurde. Die Wärmeabfuhr erfolgte nur durch die Wärmeverluste. Die Anlage wurde solange beheizt, bis der Systemdruck einen konstanten Wert angenommen hatte. Bei dem sich dabei einstellenden stationären Zustand wurden die Ultraschallsignale aufgezeichnet. Die Einstellwerte wurden aus folgenden Wertereihen entnommen:

Tabelle 4.3 Einstellwerte für die Wasser-Wasserdampf-Versuche

V_w , l/h	0	300	475	754	1194	1893	3000
	4755	7536	11943	18929	30000		
P_{el} , kW	4	8	12	16	20		

Nachteilig ist, daß die Volumenstromdichte des Dampfes am Ort der Messung nicht meßtechnisch bestimmt werden kann. Deshalb wurde ein Feld aus 8 nadelförmigen Leitfähigkeitssonden, die in der vertikalen Testsektion eingebaut waren, für den Vergleich mit den Luft-Wasser-Experimenten genutzt. Die Sonden liefern eine radiale Gas- bzw. Dampfgehaltsverteilung, aus der ein mittlerer volumetrischer Gas- bzw. Dampfanteil berechnet werden kann.

5 Mustererkennung

5.1 Prinzip der Bestimmung von Parametern der Zweiphasenströmung durch Mustererkennung

In der vorliegenden Arbeit wurde das Ziel verfolgt, ein Meßverfahren zu entwickeln, das die Ermittlung bestimmter Parameter (Meßgrößen) einer Zweiphasenströmung durch die Klassifizierung der Amplitudenverläufe von Ultraschall-Transmissions- und/oder Reflexionssignalen (primäre Meßsignale) vollzieht. Das Verfahren unterteilt sich in eine Trainings- oder Lernphase und in eine Test- oder Klassifizierungsphase, den eigentlichen Meßvorgang. In der Trainingsphase werden dem Mustererkennungsverfahren Stichproben von Meßsignalen zugeführt, die bei bekannten Werten der Meßgrößen aufgenommen wurden. Das Training des Mustererkennungsverfahrens besteht darin, daß eine Relation zwischen der Menge der primären Meßsignale und der Menge der Meßgrößen aufgebaut wird. Dies geschieht, indem die Stichproben der Meßsignale über eine genau definierte Transformation, der sog. Merkmalsextraktion, in einen Merkmalsvektor überführt werden. Der Merkmalsvektor wird unter Zuordnung der jeweiligen Werte der Meßgrößen in einer Datenbank abgelegt. Diese Methode wird als überwachtes Lernen bezeichnet.

In der Test- oder Klassifizierungsphase werden Stichproben von Meßsignalen aufgenommen, bei denen die dazugehörigen Meßgrößen unbekannt sind. Sie werden durch Anwendung derselben Transformation in Merkmalsvektoren überführt, die in der Trainingsphase zur Merkmalsextraktion verwendet wurde. In der während der Trainingsphase aufgebauten Datenbank wird nun nach Merkmalsvektoren gesucht, die eine größtmögliche Ähnlichkeit zu dem aus dem zu klassifizierenden Strömungszustand stammenden Vektor aufweist. Nach dessen Identifizierung können die gesuchten Meßgrößen als zugeordnete Information aus der Datenbank ausgelesen werden. Diese grundlegende Verfahrensweise ist in Bild 5.1 dargestellt.

Die Ähnlichkeit zwischen Merkmalsvektoren, die in der Trainings- und der Klassifizierungsphase errechnet werden, wird mit Hilfe einer Metrik bestimmt. Die Metrik ist eine Vorschrift zur Bestimmung eines skalaren Abstandsmaßes zwischen zwei Merkmalsvektoren. Mit zunehmender Ähnlichkeit zweier Merkmalsvektoren liefert die Metrik abnehmende Werte.

Die Überführung der primären Meßsignale in Merkmalsvektoren ist aus zwei Gründen notwendig: Erstens muß beim Aufbau der Datenbank in der Trainingsphase eine Komprimierung der primären Meßinformation erfolgen, wenn es sich wie im Fall der Ultraschallsignale um umfangreiche Zeitreihen von fluktuierenden Werten handelt, wie z.B. der momentanen Amplitude des Transmissionssignals. Zweitens muß bei der Merkmalsextraktion eine Trennung charakteristischer Signalanteile von wenig oder nicht charakteristischen Anteilen erfolgen, um eine hohe Zuverlässigkeit der Klassifizierung zu erreichen.

Der Charakter des Ultraschall-Transmissionssignals ist von einer Abschattung des Schallstrahls durch Gaspartikel geprägt. Zusätzliche Einflüsse sind durch die Brechung und Beugung des Schalls an Phasengrenzen gegeben. Bei niedrigen Gasanteilen verursachen Gasblasen temporäre Abnahmen der Intensität des empfangenen Schalls, die zu schwer oder nicht vorhersagbaren Zeitpunkten eintreten. Wächst der Gasanteil an, so überlagern sich die einzelnen Ereignisse zu einem

schwer interpretierbaren, fluktuierenden Pegel der empfangenen Signalintensität. Das primäre Meßsignal nimmt stochastische Züge an. Aus diesem Grund bieten sich statistische Verfahren zur Merkmalsextraktion an, die mehr oder weniger unempfindlich gegenüber dem Zeitpunkt des Eintreffens von charakteristischen Ereignissen im Signalverlauf sind, d.h. den Phasenanteil des Signalverlaufs ignorieren.

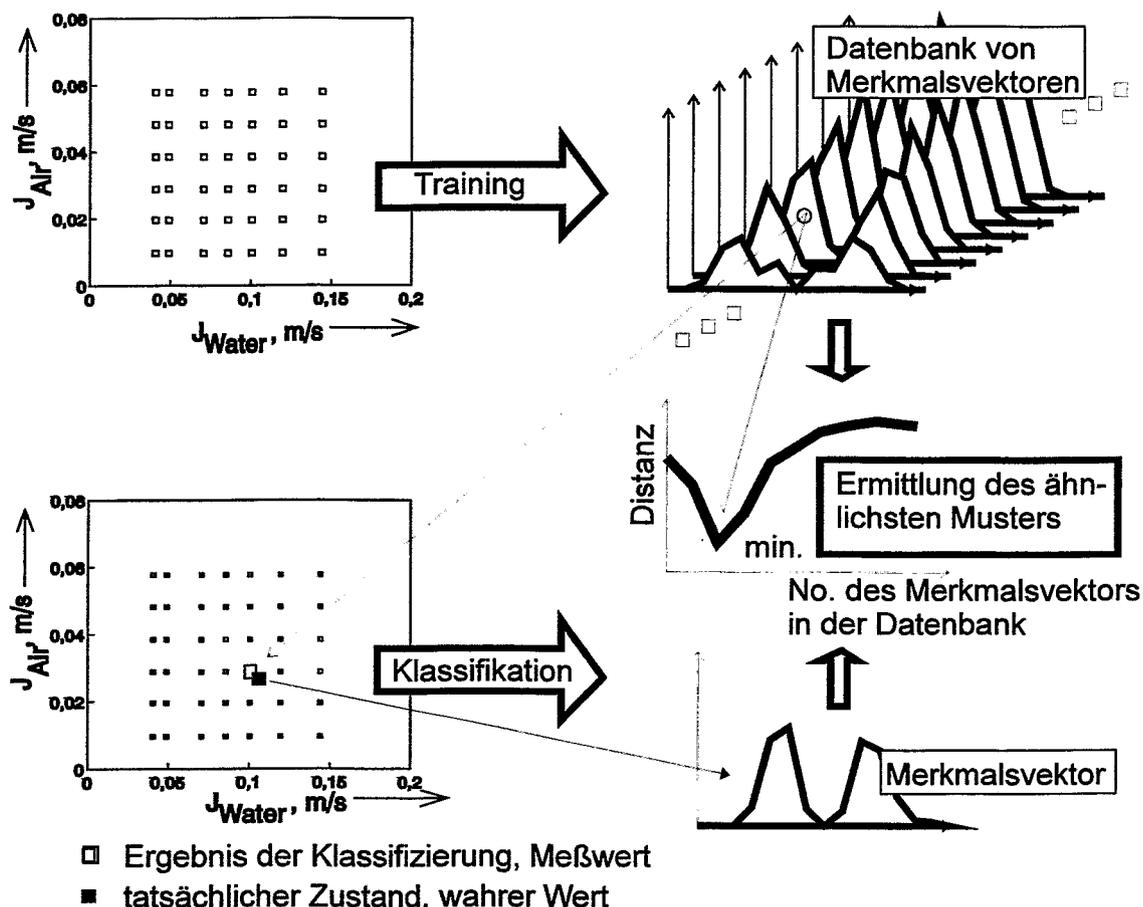


Bild 5.1 Schematische Darstellung der Messung der Volumenstromdichten von Flüssig- und Gasphase mit Hilfe der Mustererkennung

Bestimmte Rauschanteile, die nicht durch die Strömung hervorgerufen werden, können u.U. durch eine Filterung des primären Meßsignals vor der Merkmalsextraktion verringert werden. Derartige Filter werden meist mit einem Tiefpaßverhalten ausgestattet, d.h. höherfrequente Signalanteile werden unterdrückt.

Der für die Erzielung eines möglichst genauen Meßverfahrens, d.h. einer möglichst hohen Zuverlässigkeit der Klassifikation von Meßsignalen, optimale Merkmalsextraktionsalgorithmus kann nur durch Tests anhand von realen, aus dem Prozeß stammenden Daten gefunden werden. Das gleiche gilt für die Auswahl der optimalen Metrik sowie für die Filterung des primären Meßsignals vor der Merkmalsextraktion.

5.2 Meßgrößen

Die Meßgrößen, auf deren Bestimmung die Mustererkennung in dieser Arbeit abzielt, sind in erster Linie die Volumenströme der beiden Phasen Gas und Flüssigkeit. Bei ansonsten identischen Randbedingungen, wie gleichen thermodynamischen Parametern des Strömungsmediums und gleicher Rohrgeometrie, liegen nach einer ausreichenden Einlaufstrecke identische Strömungsformen mit ihren charakteristischen zeitlichen Fluktuationen der Gasgehaltsverteilung vor. Zur Rohrleitungsgeometrie gehört der Innendurchmesser sowie die Orientierung im Raum. Im Hinblick auf die Ultraschallausbreitung, die auch durch die Rohrwandung beeinflusst wird, muß die Wandstärke und das Material der Rohrleitung zu den einzuhaltenden Randbedingungen gezählt werden. Es wird von der Hypothese ausgegangen, daß die Fluktuationen der Gasgehaltsverteilung sich eindeutig im Ultraschallsignal widerspiegeln. In den weiteren Betrachtungen wird mit Volumenstromdichten (Leerrohrgeschwindigkeiten) gearbeitet, d.h. mit Volumenströmen, die auf die Querschnittsfläche der jeweiligen Rohrleitung bezogen sind.

Neben der simultanen Bestimmung der Volumenstromdichten der beiden Phasen werden im weiteren auch Betrachtungen zur qualitativen Beschreibung der Strömungsform angestellt. Bei letzterem besteht die Meßgröße im Wert einer linguistischen Variablen, durch den die Strömung einer Klasse von vergleichbaren Strömungszuständen zugeordnet wird. Konkrete Werte der Meßgröße können z.B. "Blasenströmung", "Pfropfenströmung" sein (s. Punkt 2.1).

5.3 Signalfilterung

Für die Filterung des primären Meßsignals wurde ein zentraler linearer Operator verwendet, dessen Koeffizienten a_j nach Savitzky-Golay (1964) berechnet wurden:

$$u_{f,i} = \sum_{j=-m}^{j=m} a_j \cdot u_{i+j} \quad (5.1)$$

Die Koeffizienten werden durch die Anpassung eines Polynoms n -ter Ordnung ($n < 2m + 1$) an die Werte der Zeitreihe u_i von $i = i_0 - m$ bis $i = i_0 + m$ berechnet, wobei i_0 der Index des Momentanwerts ist, für den der Wert des gefilterten Signals $u_{f,i}$ berechnet werden soll. Beim Savitzky-Golay-Filter erfüllen die Koeffizienten die folgende Beziehung $a_{-i} = a_i$. Daraus folgt, daß das Filter keine Phasenverschiebung verursacht. Es hat damit den Vorteil, daß Peaks im Signal in ihrer Lage nicht verändert werden, weshalb es gern zur Auswertung von Spektren genommen wird. Bei den Ultraschallsignalen ist anzunehmen, daß Peaks im Zeitbereich, die durch die wechselnde Abschattung oder Reflexion des Strahls entstehen, eine große Rolle spielen, was zur Auswahl dieses Filtertyps geführt hat.

Das Filter wird durch die beiden Parameter n und m vollständig beschrieben. Hierbei ist n die Ordnung des Filters und identisch mit der Ordnung des Anpassungspolynoms. Der Parameter m bestimmt die Blocklänge der Eingangswerte, die zur Berechnung eines Werts in der gefilterten Zeitreihe herangezogen werden. Die Blocklänge beträgt $2m + 1$. Mit wachsender Ordnung n wird die Peakhöhe immer besser reproduziert. Das Filter weist das in Bild 5.2 anhand von Beispielen dargestellte Tiefpaßverhalten auf, so daß hochfrequentes Rauschen unterdrückt wird.

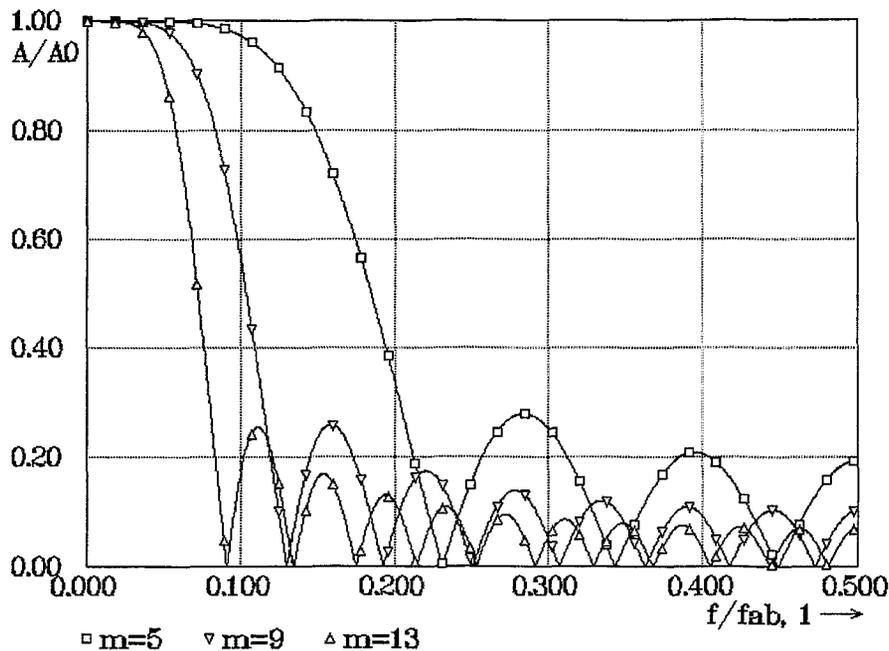


Bild 5.2 Frequenzgang des Savitzky-Golay-Filters 5. Ordnung bei verschiedener Blocklänge m , f_{ab} = Abtastfrequenz

5.4 Untersuchte Merkmalsextraktionsverfahren

5.4.1 Allgemeine Kriterien

Bei der Auswahl der in Frage kommenden Merkmalsextraktionsverfahren wurde auf die Erfahrungen aus der Machbarkeitsstudie zurückgegriffen. Vorteilhaft sind Verfahren, die unabhängig von der Signalamplitude sind. Damit werden Veränderungen des Übertragungsfaktors der Meßkette, wie sie z.B. durch die begrenzte Reproduzierbarkeit der Ankoppelbedingungen beim Anbringen der Wandler auf die Rohrleitung entstehen, keinen Einfluß auf das Meßergebnis haben, solange die Aussteuerung des Empfängers ausreicht.

Die Beschränkung auf Methoden, die amplitudenunabhängig sind, führt allerdings dazu, daß wichtige signifikante Signalanteile für die Klassifizierung nicht zur Verfügung stehen. So besteht eine deutliche und charakteristische Abhängigkeit des Mittelwerts sowie des Schwankungsanteils des demodulierten Durchschallungssignals von den Volumenstromdichten (vgl. Abschnitt 9).

Untersuchungen des Spektrums des Transmissionssignals haben gezeigt, daß ausgeprägte Frequenzpeaks, die als Komponenten des Merkmalsvektors geeignet wären, nicht zu beobachten sind. Das Frequenzspektrum des demodulierten Empfangssignals besitzt vielmehr ein kontinuierliches Spektrum. Da charakteristische Frequenzen fehlen, wurde im weiteren ausschließlich auf Methoden gesetzt, die das Signal im Zeitbereich charakterisieren.

5.4.2 Polares Verfahren (DTE)

In der Machbarkeitsstudie (Prasser et al. 1994a) wurden verschiedene polare Verfahren zur Merkmalsextraktion untersucht. Es werden Häufigkeitsverteilungen von Zeitdifferenzen zwischen charakteristischen Ereignissen im Signalverlauf berechnet (z.B. Polaritätswechsel, daher „polare Verfahren“). Die während der gesamten Meßzeit ermittelten einzelnen Zeitdifferenzen werden in einem Histogramm aufsummiert. Die einzelnen Klassen des Histogramms werden als Komponenten des Merkmalsvektors verwendet.

Der einfachste Vertreter dieser Klasse von Verfahren ist die Auswertung der Nulldurchgänge des Schwankungsanteils des demodulierten Ultraschallsignals. Vom Signalverlauf muß hierbei vorher der Mittelwert abgezogen werden, um zum Schwankungsanteil zu gelangen. Als charakteristisches Ereignis wird der Zeitpunkt eines Vorzeichenwechsels des Schwankungsanteils gewertet.

Die Machbarkeitsstudie ergab, daß die Auswertung der Zeitdifferenzen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Extremwerten des Signals bessere Klassifizierungsergebnisse liefert, als die Auswertung der Nulldurchgänge. Beide Verfahren sind unabhängig vom Effektivwert der Schwankungen und damit vom Übertragungsfaktor des Meßsystems. Bei der Auswertung der Extrema kann außerdem die Abtrennung des Schwankungsanteils entfallen.

In der Machbarkeitsstudie wurden außerdem Methoden getestet, bei denen das Integral des Schwankungsanteils zwischen zwei Nulldurchgängen bzw. die Signaldifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Extrema ausgewertet wurden. Die auf diese Weise erzeugten Merkmalsvektoren sind vom Übertragungsfaktor der Meßkette abhängig. Gegenüber der Verwendung der Zeitdifferenzen wurde damit jedoch nur ein geringer Zuwachs bei der Erkennungsrate erreicht, der den Nachteil der Abhängigkeit vom Übertragungsfaktor nicht rechtfertigt.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde deshalb die Auswertung der Zeitdifferenzen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Extremwerten ausgewählt. Im weiteren wird die Abkürzung DTE (Differenz der ZeiT zwischen Extremwerten) verwendet. Die Zeitdifferenz Δt_{E_i} wird als ein ganzzahliges Vielfaches der Abtastperiode Δt_{Tast} ermittelt. Aus dem Signalverlauf werden alle verfügbaren, aufeinanderfolgenden Extremwerte ausgewertet, deren Anzahl n_E betragen soll. Es wird eine Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung in Form eines Histogramms berechnet, dessen Klassenwerte die Komponenten m_k des Merkmalsvektors \vec{M} bilden. Um die Dimension des Merkmalsvektors zu begrenzen, wird die Breite der einzelnen Klassen h_k exponentiell gestaffelt. Die Vorschrift für die Bildung des Histogramms läßt sich wie folgt formalisieren:

$$\forall k, 1 \leq k \leq n_M: m_k = h_k = \sum_{i=1}^{n_E} \begin{cases} 1 & \text{wenn } 2^{k-1} \leq \frac{\Delta t_{E_i}}{\Delta t_{Tast}} < 2^k \\ 0 & \text{(anderenfalls)} \end{cases} \quad (5.2)$$

Durch die exponentielle Staffelung der Klassenbreite wird der Tatsache Rechnung getragen, daß große Zeitdistanzen wesentlich seltener auftreten, als kleine. Die

Klassenbreite wächst mit zunehmender Zeitdifferenz, wodurch vermieden wird, daß in den höheren Klassen nur noch einzelne Ereignisse registriert werden.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß bei einer relativ kleinen Dimension des Merkmalsvektors garantiert alle möglichen Paare von Extremwerten erfaßt werden können. Bei einer Meßzeit von beispielsweise 10 s und einer Abtastfrequenz von 1 kHz umfaßt eine Zeitreihe des primären Meßsignals $N=10000$ Werte. Die maximal mögliche Zeitdifferenz beträgt somit ebenfalls $10000 \cdot \Delta t_{\text{Tast}}$. Ein derartiges Ereignis würde in Klasse h_{14} eingetragen werden. Höhere Klassen sind in diesem Fall nicht erforderlich. In der Praxis genügt eine Dimension von $n_M = 10$, um alle Ereignisse zu erfassen. Meist enthalten hierbei bereits einige der höheren Histogrammklassen den Wert Null. Deshalb können die normierten Metriken nach Gleichungen 5.10 und 5.12 bei diesem Merkmalsextraktionsverfahren nicht verwendet werden, da eine Division durch Null auftreten würde.

5.4.3 Lineares Vorhersagemodell (VLN)

Ein lineares Vorhersagemodell (autoregressiver Prozeß) ist ein Verfahren zur parametrischen Beschreibung des primären Meßsignals u_i innerhalb eines Zeitfensters der Länge N . Es gehört zur Familie der stochastischen Signalmodelle (Makhoul 1975, Gühmann et al. 1994). Es wird angenommen, daß sich der beobachtete Wert u_i als Linearkombination von n_M Vorgängern u_{i-j} (deterministischer Anteil) und einer additiven Störung ε_i (stochastischer Anteil) darstellen läßt:

$$u_i = \varepsilon_i + \sum_{j=1}^{n_M} \hat{a}_j \cdot u_{i-j} \quad (5.3)$$

Die Schätzung der Vorhersageparameter \hat{a}_j erfolgt durch Minimierung des quadratischen Vorhersagefehlers, ermittelt über die gesamte Zeitreihe der primären Meßinformation:

$$E = \sum_{i=n_M+1}^N \varepsilon_i^2 = \sum_{i=n_M+1}^N \left(u_i - \sum_{j=1}^{n_M} \hat{a}_j \cdot u_{i-j} \right)^2 \rightarrow \text{MIN} \quad (5.4)$$

Nach Ableitung von Gl. (5.4) liegt ein lineares Gleichungssystem bezüglich der Vorhersageparameter vor. Beim Verfahren VLN (Vorhersagemodell LiNear) werden die durch Lösung des Gleichungssystems ermittelten Vorhersageparameter als Komponenten des Merkmalsvektors verwendet, d.h. $m_k = \hat{a}_k$.

5.4.4 Fraktales Verfahren (FRC)

Die Länge der Küstenlinie in Abhängigkeit von der Diskretisierung charakterisiert die fraktale Dimension einer Figur. Übertragen auf das primäre Meßsignal kann eine Küstenlinie als Gesamtlänge der durch die Zeitreihe beschriebenen Kurve definiert werden:

$$L = \sum_{j=2}^N \sqrt{(u_j - u_{j-1})^2 + \Delta t_{\text{Tast}}^2} \quad (5.5)$$

Die Küstenlinie verkürzt sich, wenn der Abstand zwischen den Stützstellen vergrößert wird. Die folgende Formel gibt die Länge der Küstenlinie für einen Zeitschritt von $\Delta t = i \cdot \Delta t_{\text{Tast}}$ an:

$$L_i = \frac{1}{i} \sum_{j=i+1}^N \sqrt{(u_j - u_{j-i})^2 + (i \cdot \Delta t_{\text{Tast}})^2} \quad (5.6)$$

In der Formel (5.6) wird automatisch eine Mittelung der Längen von Küstenlinien vorgenommen, die bei $i \neq 1$ an i verschiedenen Anfangspunkten ansetzen können.

Leider ist es nicht möglich, die nach Gl. (5.6) berechneten Werte auf die mittlere Amplitude des primären Meßsignals zu normieren, da die Größen u und t mit verschiedenen Maßeinheiten behaftet sind. Eine Normierung ist möglich, wenn eine modifizierte Länge der Küstenlinie L_m verwendet wird, bei der nur die Änderungen der Signalamplitude summiert werden:

$$L_{m,i} = \frac{1}{i} \sum_{j=k+1}^N |u_j - u_{j-i}| \quad (5.7)$$

Die Normierung $\hat{L}_i = L_{m,i} / L_{m,1}$ macht die Längen maßeinheitenlos und unabhängig von der mittleren Signalamplitude. Als Komponenten des Merkmalsvektors wurden die normierten Längen verwendet, die für verschiedene i aus der Menge der Zweierpotenzen berechnet wurden:

$$\forall k, 1 \leq k \leq n_M: m_k = \hat{L}_p \quad \text{mit } p = 2^k \quad (5.8)$$

Die im folgenden verwendete Abkürzung für dieses Merkmalsextraktionsverfahren lautet FRC (FRaCtales Verfahren). Bei den weiteren Untersuchungen wurde stets die exponentielle Staffelung nach Gl. (5.8) in Verbindung mit der Dimension $n_M = 10$ verwendet. Der Vorteil der exponentiellen Staffelung besteht, wie beim Verfahren DTE darin, daß wenige Elemente des Merkmalsvektors einen breiten Bereich der Diskretisierung $\Delta t = i \cdot \Delta t_{\text{Tast}}$ überstreichen.

5.5 Metriken

Zur Bestimmung der Distanz zwischen zwei Merkmalsvektoren wurden vier verschiedene Metriken getestet:

a) Euklidische Metrik

Die Euklidische Metrik ist die gebräuchlichste Metrik. Die Distanz zweier n -dimensionaler Merkmalsvektoren \vec{m}_A und \vec{m}_B ergibt sich als Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate der Differenzen der einzelnen Komponenten beider Vektoren:

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_M} (m_{A,i} - m_{B,i})^2} \quad (5.9)$$

Die so berechnete Distanz entspricht dem geometrischen Abstand zweier Punkte im n-dimensionalen Raum der Merkmalsvektoren in kartesischen Koordinaten.

b) Normierte Euklidische Metrik

Die einzelnen Komponenten des Differenzvektors gehen durch die Euklidische Metrik absolut in den Gesamtabstand ein. Durch eine Normierung der einzelnen Differenz mit den Absolutwerten der entsprechenden Komponenten des Vektors wird eine Distanz berechnet, die auf der relativen Abweichung der einzelnen Vektorkomponenten beruht. Dies kann von Vorteil sein, wenn die Komponenten des Merkmalsvektors sehr unterschiedliche Absolutwerte aufweisen, die relative Änderung der einzelnen Komponente jedoch den Hauptinformationsgehalt tragen. Es wurde eine Normierung auf den Mittelwert der jeweiligen Komponenten des Merkmalsvektors gewählt:

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_M} \left(\frac{m_{A,i} - m_{B,i}}{(m_{A,i} + m_{B,i}) / 2} \right)^2} \quad (5.10)$$

c) City-Block-Metrik

Bei der City-Block-Metrik werden die Beträge der Differenzen der einzelnen Komponenten der zu vergleichenden Vektoren addiert:

$$d = \sum_{i=1}^{n_M} |m_{A,i} - m_{B,i}| \quad (5.11)$$

Diese Metrik kann man sich veranschaulichen, indem man sich vorstellt, in einem orthogonalen Koordinatennetz (also z.B. in einem rechtwinkligen Straßennetz einer Großstadt) von einem Punkt A zu einem Punkt B gelangen zu müssen. Die City-Block-Metrik ergibt die Distanz, die man zurücklegen muß, wenn man sich jeweils nur entlang einer der Koordinatenrichtungen fortbewegen kann.

d) Normierte City-Block-Metrik

Hierbei wird eine Normierung der Differenzen zwischen den einzelnen Komponenten auf deren Absolutwerte vorgenommen:

$$d = \sum_{i=1}^{n_M} \frac{|m_{A,i} - m_{B,i}|}{|m_{A,i} + m_{B,i}| / 2} \quad (5.12)$$

Die Auswahl der Metrik beeinflusst die Güte der Klassifizierung. Eine Vorhersage hinsichtlich der optimalen Metrik kann jedoch nicht getroffen werden, da ein Modell des Prozesses nicht zur Verfügung steht. Die Entscheidung kann nur aufgrund der Erprobung des Mustererkennungsverfahrens anhand von Testdaten gefällt werden, die aus Messungen stammen.

5.6 Test und Gegenüberstellung der verschiedenen Mustererkennungsverfahren

Der Test der Mustererkennungsverfahren wird anhand einer Matrix von Volumenstromdichten vorgenommen, für die jeweils mehrere Realisierungen des jeweils zu untersuchenden Ultraschallsignals aufgenommen und abgespeichert worden sind (Testmatrix). Die primären Meßsignale können vor Eingabe in das Mustererkennungsprogramm, das eines der o.g. Verfahren umsetzt, in mehrere Stichproben unterteilt werden.

Das Mustererkennungsverfahren wird für jeden Punkt der Testmatrix mit einer festgelegten Anzahl von Stichproben angelernt (Trainingsphase). Anschließend werden alle übrigen generierbaren Stichproben, die ungleich der Trainingsstichproben sind, einer Klassifizierung unterzogen. Das Ergebnis besteht in einer Zuordnung von identifizierten zu tatsächlich vorgegebenen Testpunkten. Im Idealfall müßten alle identifizierten Testpunkte mit den vorgegebenen Punkten übereinstimmen, was einer Erkennungsrate E_{ges} von 100 % entspricht. In der Realität ist die Erkennungsrate geringer. Sie charakterisiert die Qualität des Mustererkennungsverfahrens innerhalb des Bereichs von Volumenstromdichten, die die Testmatrix umfaßt.

Neben der Gesamterkennungsrate wird in den folgenden Abschnitten auch mit partiellen Erkennungsraten für Wasser (E_W) bzw. Luft (E_L) gearbeitet. Dabei wird die Anzahl der klassifizierten Stichproben ermittelt, bei denen wenigstens für eine der beiden Phasen die richtige Volumenstromdichte ermittelt wird. Die partiellen Erkennungsraten sind stets größer als die Gesamterkennungsrate.

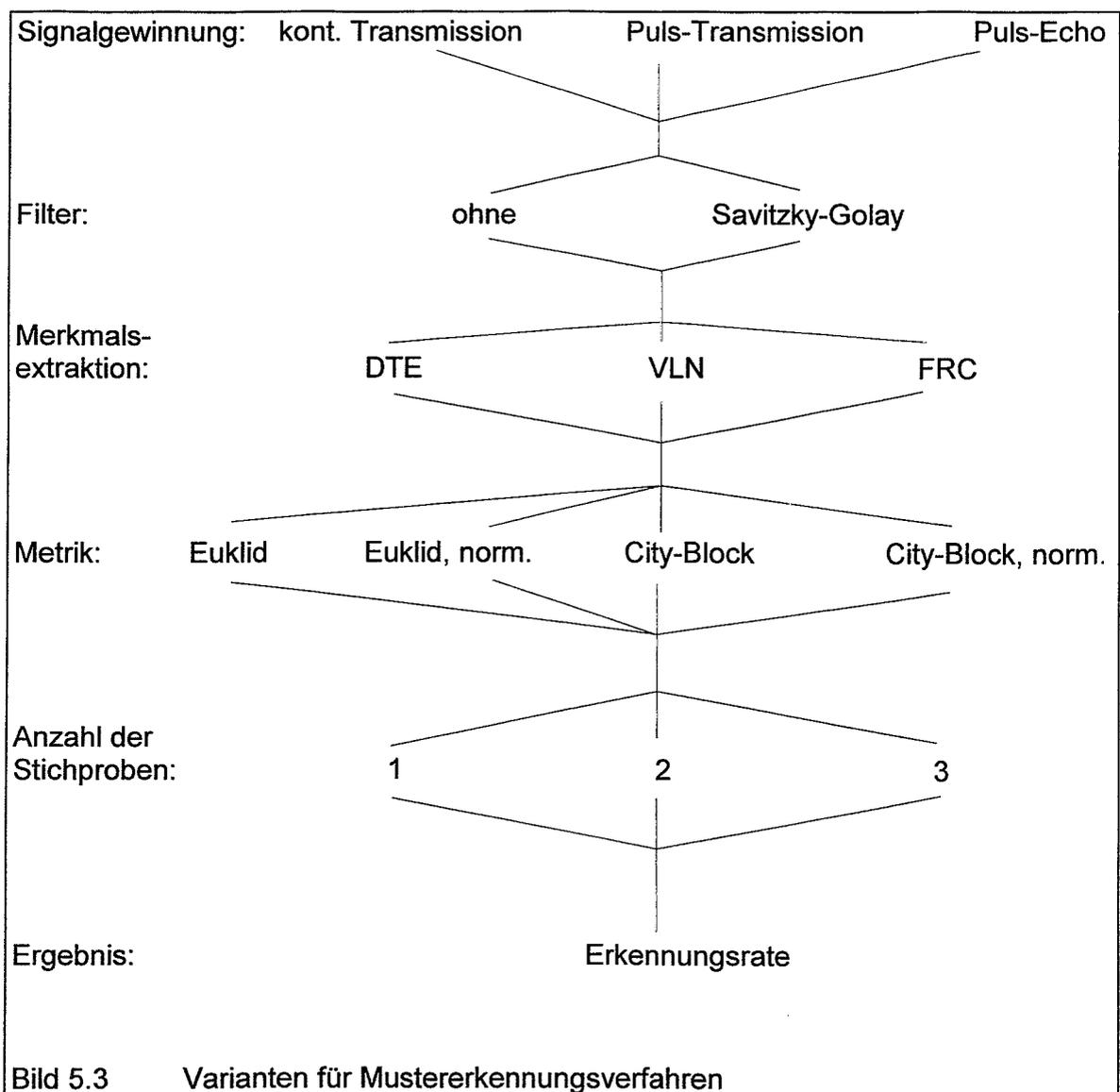
Die Erkennungsrate charakterisiert die Güte der Klassifizierung nicht vollständig. Falsch zugeordneten Testpunkte können sich in der Testmatrix in größerem oder kleinerem Abstand von den vorgegebenen Werten befinden. Ein integrales Maß, das diese Unterschiede berücksichtigt, steht durch Berechnung der mittleren relativen Abweichung aus den identifizierten und den trainierten Volumenstromdichten nach folgender Formel zur Verfügung:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n_{\text{Test}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{Test}}} \left| \frac{J_{W,id} - J_{W,tr}}{J_{W,tr}} \right| + \left| \frac{J_{L,id} - J_{L,tr}}{J_{L,tr}} \right| \quad (5.13)$$

Mit Hilfe der genannten Kriterien wird die Auswahl des geeignetsten Mustererkennungsverfahrens durchgeführt.

5.7 Zusammenfassung der Varianten von untersuchten Mustererkennungsalgorithmen

Die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Möglichkeiten zur Merkmalsextraktion, die verschiedenen Metriken, die Option der Signalfilterung vor der Merkmalsextraktion sowie die Möglichkeit, die Anzahl der Stichproben für die Lernphase zu variieren, ergibt folgende Varianten von Mustererkennungsverfahren:



Die in Bild 5.3 zusammengefaßten Komponenten des Gesamtverfahrens lassen sich weitgehend frei kombinieren. Beim linearen Vorhersagemodell VLN kommen weitere Varianten hinzu, die sich durch die Wahl der Modellordnung ergeben. Deswegen existiert eine große Zahl von Varianten, die bei der Optimierung trotz der Beschränkung auf die wenigen Merkmalsextraktionsverfahren in Betracht gezogen werden müssen. Dazu kommt, daß nicht ausgeschlossen werden kann, daß sich die optimalen Kombinationen für eine vertikale und eine horizontale Rohrleitung unterscheiden. Es ergibt sich folglich ein sehr großer Testaufwand, wenn man bedenkt, daß Testmatrizen von über 200 Volumenstrompaaren zu untersuchen sind.

6 Optimierung des Mustererkennungsverfahrens anhand einer Wasser-Luft-Strömung in vertikalen Rohrleitungen

6.1 Testdaten

Für die Optimierung des Mustererkennungsverfahrens wurden die primären Meßsignale herangezogen, die an der vertikalen Testsektion mit 51,2 mm Innendurchmesser im Luft-Wasser-Betrieb bei Normaltemperatur (20 °C) und Umgebungsdruck aufgenommen wurden. Die Messungen wurden mit drei Hardwarevarianten durchgeführt, die in Tabelle 6.1 zusammengefaßt sind: (1) kontinuierliche Transmission mit gewobelter Anregung, Hochtemperaturaufnehmer LNA-4, (2) Pulsbetrieb, Wellenleitersensoren aus Nishny Novgorod, (3) Pulsbetrieb, Wellenleitersensoren aus Nishny Novgorod, erhöhte Pulsfolgefrequenz. Beim Pulsbetrieb werden sowohl Echo- als auch Transmissionssignale erhalten, so daß insgesamt 5 verschiedene Signalgewinnungsmöglichkeiten gegenüberzustellen sind:

Tabelle 6.1 Testserien für die Optimierung des Mustererkennungsverfahrens, vertikale Rohrleitung, Innendurchmesser 51,2 mm, Atmosphärendruck, Normaltemperatur (20 °C)

Abk.	Sensoren	Betriebsart	Puls- bzw. Wobbel-frequenz	Abtast-frequenz	Länge der Stichproben bei 5 s Meßzeit	Anzahl der verfügbaren Stichproben
V5KT	LNA-4	kont. Transm.	1 kHz	1 kHz	5000	30
V5PE	Wellenleiter	Puls-Echo	600 Hz	2 kHz	10000	15
V5PT	Wellenleiter	Puls-Transm.	600 Hz	2 kHz	10000	15
V5PEN	Wellenleiter	Puls-Echo	3 kHz	3 kHz	15000	10
V5PTN	Wellenleiter	Puls-Transm.	3 kHz	3 kHz	15000	10

Die verwendeten Datensätze umfaßten in allen drei Fällen jeweils 5 Zeitreihen (Meßfiles) von 30000 Einzelwerten. Wie schon die Voruntersuchungen im Rahmen der Machbarkeitsstudie (Prasser et al. 1994a) zeigten, nimmt die Erkennungsrate mit wachsender Meßzeit zu. Um vergleichbare Testbedingungen zu gewährleisten, wurde eine Meßzeit von 5 s als gemeinsamer Nenner gefunden. Durch Unterteilung der Meßfiles kann die in der Tabelle 6.1 angegebenen Anzahl von unabhängigen Stichproben erzeugt werden. Sie ist für die einzelnen Testserien unterschiedlich. Ein Teil der Stichproben wird für das Training des Mustererkennungsverfahrens benutzt, die verbleibenden Stichproben werden anschließend mit dem trainierten Verfahren klassifiziert.

6.2 Gegenüberstellung der Mustererkennungsverfahren

Für die Gegenüberstellung der Mustererkennungsverfahren wurde zunächst einheitlich mit zwei Trainingsstichproben je Testpunkt gearbeitet. Bei Anwendung des linearen Vorhersagemodells (VLN) zur Merkmalsextraktion wurde zunächst immer die Ordnung 11 verwendet, bei der bei Voruntersuchungen gute Erkennungsraten erzielt wurden. Das Ergebnis der Testrechnungen ohne Signalfilterung und mit der City-Block-Metrik ist in Bild 6.1 dargestellt.

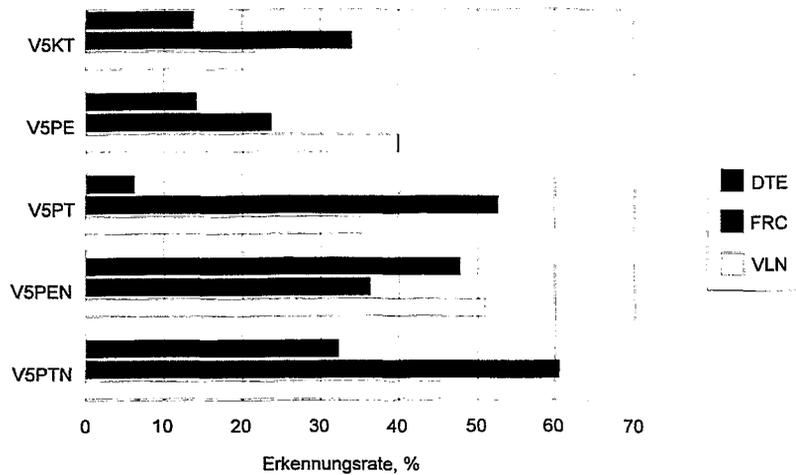


Bild 6.1 Gegenüberstellung der Merkmalsextraktionsverfahren

Ohne Filterung, vertikale Rohrleitung, 51,2 mm Durchmesser, Luft-Wasser-Strömung, Normalbedingungen

Die beste Erkennungsrate wird vom fraktalen Merkmalsextraktionsverfahren FRC bei Verwendung des Puls-Transmissionsverfahrens mit den Wellenleitersensoren und der verbesserten Signalerfassungshardware (3 kHz Pulsfolgefrequenz) erreicht. Etwa 60 % der Testpunkte werden richtig klassifiziert.

Auch bei den beiden anderen Arten von Transmissionssignalen ist das fraktale Verfahren FRC der Favorit. Die Erkennungsraten sind jedoch kleiner. Am schlechtesten schneidet die kontinuierliche Durchschallung mit den Breitbandaufnehmern

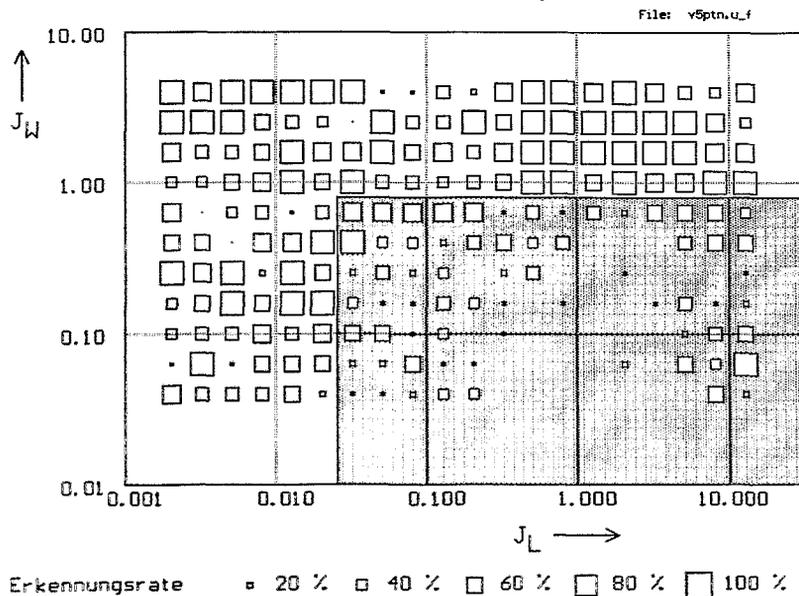


Bild 6.2 Verteilung der Erkennungsrate in der Testmatrix für das fraktale Merkmalsextraktionsverfahren FRC bei gepulstem Transmissionsbetrieb PTN

vertikale Rohrleitung, Durchmesser 51,2 mm, Luft-Wasser-Strömung

LNA-4 mit ca. 34 % ab. Beim Puls-Echo-Verfahren liefert die Merkmalsextraktion mit dem linearen Vorhersagemodell VLN die besten Ergebnisse.

Der Vergleich der verschiedenen Hardwarevarianten fällt unabhängig vom Merkmalsextraktionsverfahren stets zugunsten der Wellenleitersensoren aus Nishny Novgorod bei 3 kHz Pulsfolgefrequenz aus. Aus diesem Grund wurde die Weiterentwicklung der Hardware zur kontinuierlichen Durchschallung nicht weiter verfolgt.

Wie Bild 6.2 zeigt, ist die Erkennungsrate nicht in allen Volumenstrombereichen der Testmatrix gleich. Besonders im Gebiet von $J_W < 1$ m/s und Luftvolumenstromdichten J_L größer als etwa 0.03 m/s ist die Klassifizierung teilweise sehr schlecht. Es deutet sich an, daß das Mustererkennungsverfahren in diesem Gebiet nicht angewandt werden kann (in Bild 6.2 grau hinterlegt). Innerhalb des verbleibenden Bereichs beträgt die Erkennungsrate 79,3 %. Das Ergebnis ist im Detail in Bild 6.3 dargestellt.

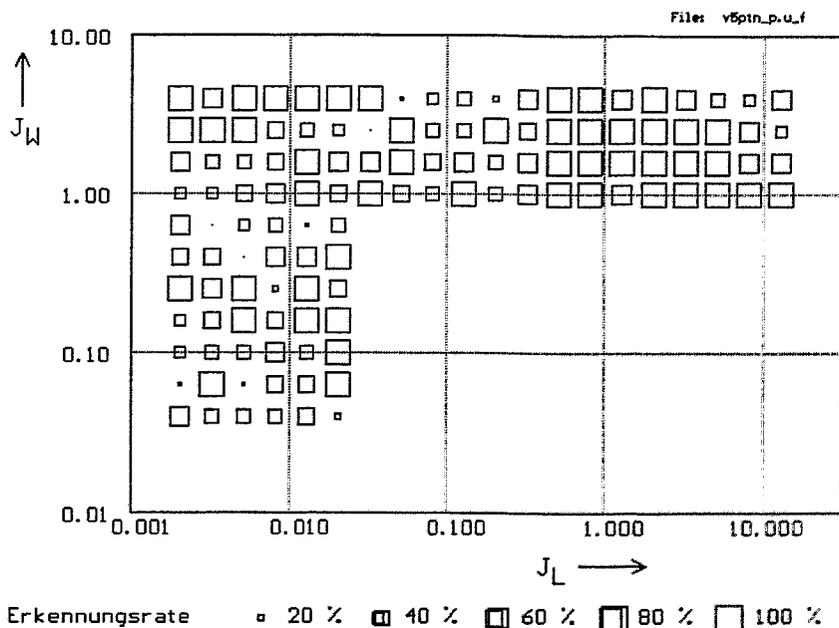


Bild 6.3 Verteilung der Erkennungsrate beim Verfahren FRC / PTN unter Ausklammerung des ungünstigen Bereichs

Leider verhält es sich mit dem Puls-Echo-Verfahren ähnlich: Wie aus den Bildern 6.4 und 6.5 ersichtlich wird, liegen die schlechten Erkennungsraten bei den anderen beiden Merkmalsextraktionsverfahren DTE und VLN im gleichen Gebiet. Eine Kombination der Methoden kann deshalb nicht zur Erweiterung des Anwendbarkeitsbereichs führen. Bei den beiden letztgenannten Ergebnissen treten außerdem gehäuft Klassifizierungsfehler bei hohen Wassergeschwindigkeiten auf.

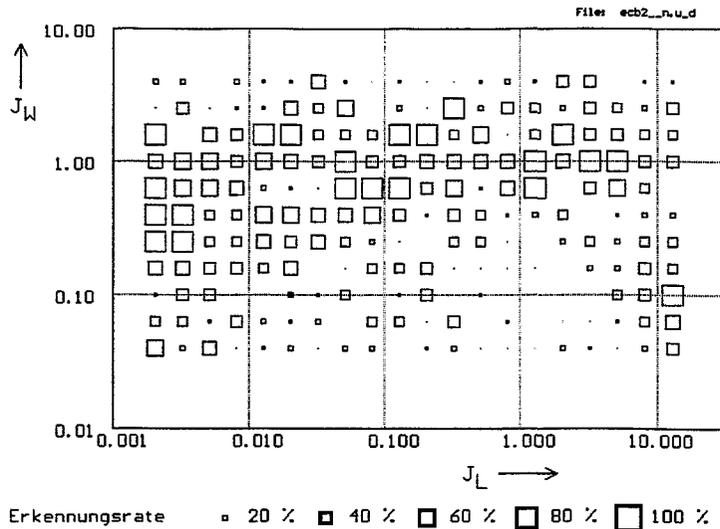


Bild 6.4 Verteilung der Erkennungsrate bei Merkmalsextraktion nach dem polaren Verfahren DTE und 3 kHz Puls-Echo-Betrieb (PEN)

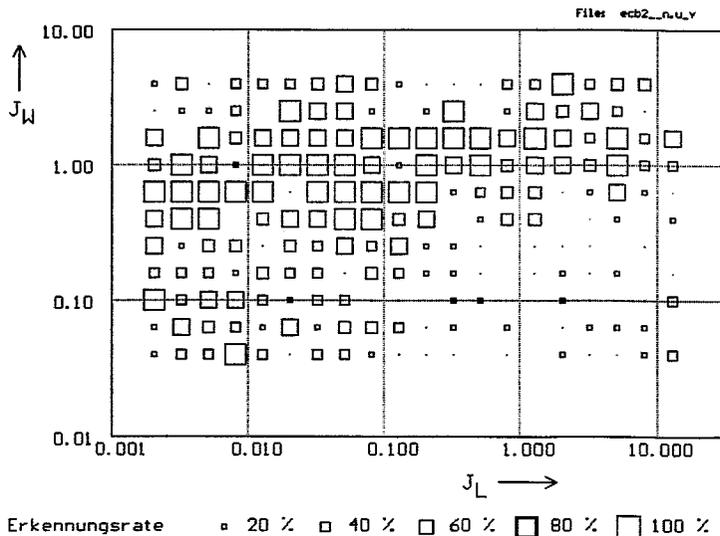


Bild 6.5 Verteilung der Erkennungsrate bei Merkmalsextraktion mit dem linearen Vorhersagemodell VLN und Puls-Echo-Betrieb mit 3 kHz (PEN)

6.3 Auswirkung der Filterung des primären Meßsignals

Eine Signalfilterung, die der Merkmalsextraktion vorgeschaltet ist, beeinflusst die Erkennungsraten. Selbstverständlich muß in der Trainings- und der Klassifizierungsphase der selbe Filteralgorithmus zur Anwendung kommen. In Bild 6.6 ist die Wirkung der Filterung bei dem polaren Merkmalsextraktionsverfahren DTE dargestellt. Verwendet wurde der Savitzky-Golay-Filter 5. Ordnung bei $m=5$, d.h. mit einer Blocklänge von $2m + 1 = 11$ Eingangswerten. Dieses Filter besitzt eine Kantenfrequenz (3dB) von $0,1635 f_{Tast}$.

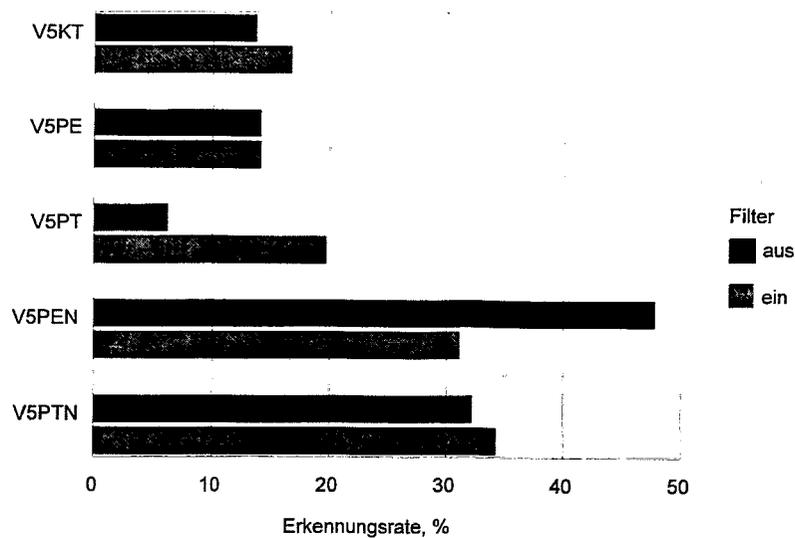


Bild 6.6 Wirkung der Filterung des primären Meßsignals auf die Erkennungsrate beim polaren Merkmalsextraktionsverfahren DTE, Savitzky-Golay-Filter, Ordnung $n=5$, Blocklänge $m=5$

Bei den drei Varianten des Transmissionsbetriebs tritt eine deutliche Verbesserung der Klassifizierung ein, während die Erkennungsraten beim Echosignal gleichbleiben bzw. zurückgehen. Dieses Ergebnis ist dadurch zu erklären, daß die typischen Transmissionsignale wesentlich höherfrequenter sind, als die Echosignale. Höherfrequente Schwankungen produzieren jedoch den Hauptanteil an aufeinanderfolgenden Extremwerten. Durch die Filterung werden die höherfrequenten Anteile unterdrückt und die Signalschwankungen, die durch größere Gaspartikel hervorgerufen werden, treten bei der Merkmalsextraktion in den Vordergrund. Die Verläufe der Echosignale sind demgegenüber bereits im Rohzustand relativ glatt. Die Filterung bewirkt hier in erster Linie einen Informationsverlust und die Erkennungsraten gehen zurück.

Wegen der bei DTE erzielten Verbesserung der Erkennungsraten wurde dieser Effekt näher untersucht, indem die Parameter des Filters variiert wurden. In Bild 6.7 ist das Ergebnis für den gepulsten Transmissionsbetrieb (PTN) dargestellt. Gegenüber dem Fall ohne Filter läßt sich eine Verbesserung der Erkennungsrate um maximal ca. 8 % erreichen. Die Rate bleibt jedoch nach wie vor hinter den Ergebnissen zurück, die mit dem fraktalen Verfahren (FRC) erzielt wurden.

Beim fraktalen Merkmalsextraktionsverfahren FRC wirkt die Filterung in jedem Fall verschlechternd auf die Erkennungsrate (Bild 6.8). Die Berechnung der Küstenlinie ist dadurch, daß die Auswertung der Signalfluktuationen in einem breiten Diskretisierungsbereich stattfindet, optimal an den stochastischen Charakter der primären Meßinformation angepaßt. Es werden hoch- und niederfrequente Anteile gleichberechtigt behandelt. Deshalb überwiegt bei der Filterung der Einfluß des Informationsverlustes und die Erkennungsraten gehen zurück. Das selbe Verhalten zeigt das lineare Vorhersagemodell VLN.

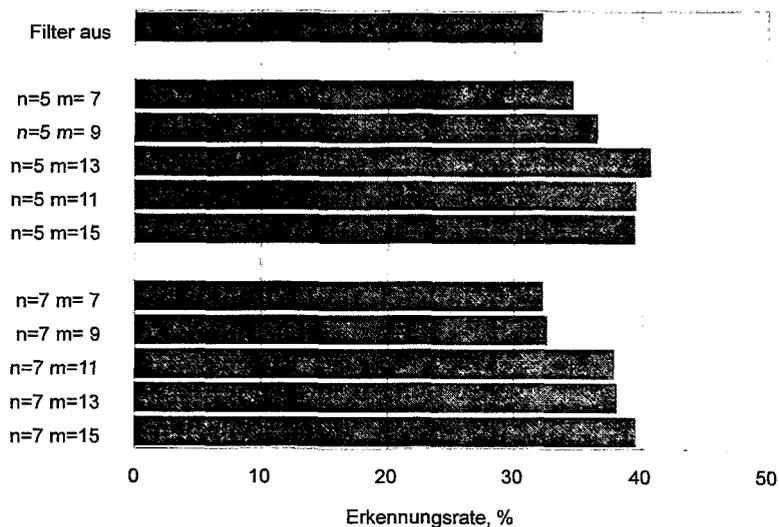


Bild 6.7 Einfluß von Ordnung n und Blocklänge m der Signalfilterung auf die Erkennungsrate beim polaren Merkmalsextraktionsverfahren DTE, Puls-Transmission, 3 kHz (PTN)

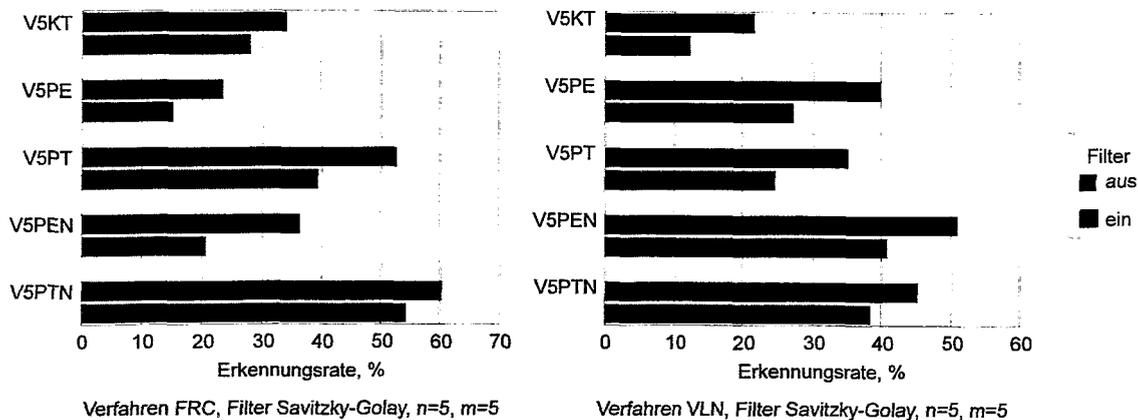


Bild 6.8 Wirkung der Signalfilterung bei den Verfahren FRC und VLN

6.4 Einfluß der Metrik

Ein gravierender Unterschied zwischen der City-Block-Metrik und der Euklidischen Metrik konnte insgesamt nicht festgestellt werden. Im folgenden wurde versucht, die guten Ergebnisse, die mit dem Fraktalen Verfahren erreicht wurden, durch Variation der Metrik weiter zu optimieren. Das Ergebnis ist in Bild 6.9 vorgestellt. Wie sich zeigte, ist von den vier getesteten Varianten die City-Block-Metrik die beste. Demgegenüber fällt die Erkennungsrate bei der Euklidischen Metrik um ca. 1 % ab. Die normierten Metriken liegen um mehrere Prozente tiefer.

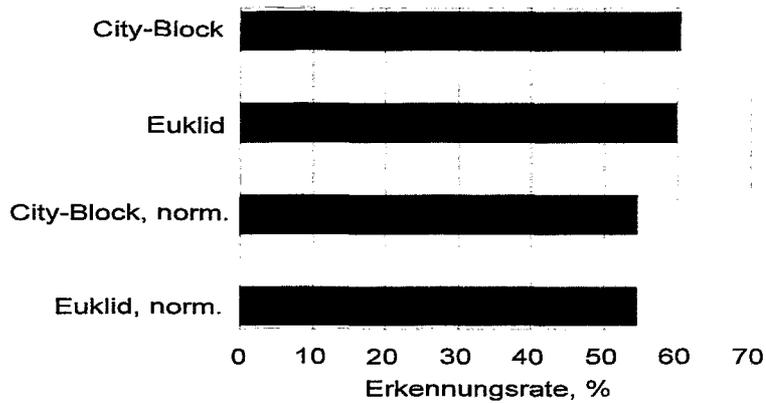


Bild 6.9 Einfluß der Metrik auf die Erkennungsrate am Beispiel des fraktalen Merkmalsextraktionsverfahrens FRC, Puls-Transmission mit 3 kHz (PTN)

Beim polaren Verfahren DTE wurde gelegentlich beobachtet, daß die Euklidische Metrik geringfügig bessere Ergebnisse liefert. Da DTE jedoch insgesamt deutlich schlechter abschneidet, wurde auf eine weitere Untersuchung dieses Verfahrens verzichtet.

6.5 Einfluß der Ordnung des linearen Vorhersagemodells (VLN)

Die Ergebnisse werden am Beispiel der Daten des Puls-Echo-Verfahrens (PEN) illustriert, bei denen das lineare Vorhersagemodell (VLN) bei der Gegenüberstellung der verschiedenen Merkmalsextraktionsmöglichkeiten als bestes Verfahren abgeschnitten hatte. Wie Bild 6.10 anhand dieses Beispiels zeigt, besteht eine geringfügige Abhängigkeit der Erkennungsrate von der Ordnung. Eine wesentliche Verbesserung bzw. bessere Ergebnisse, als mit dem fraktalen Verfahren FRC lassen sich jedoch nicht erreichen. Die Tendenzen und die optimale Ordnung (hier die Ordnung 8) unterscheiden sich von Datensatz zu Datensatz.

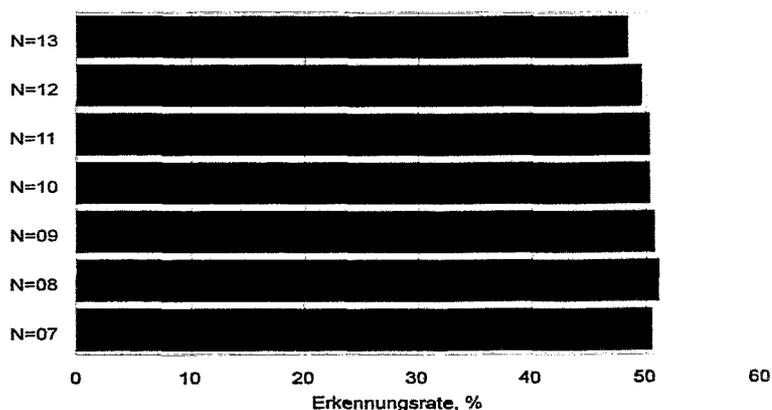


Bild 6.10 Einfluß der Ordnung des linearen Vorhersagemodells VLN auf die Erkennungsrate

6.6 Abhängigkeit der Erkennungsrate von der Meßzeit und der Anzahl der Trainingsstichproben

Wie schon in der Machbarkeitsstudie (Prasser et al. 1994a) festgestellt wurde, wächst die Erkennungsrate mit zunehmender Meßzeit an. Bild 6.11 illustriert diesen Umstand für die Puls-Transmissionsdaten PTN und das fraktale Merkmalsextraktionsverfahren FRC bei zwei Trainingsstichproben. Die Erkennungsrate wächst von ca. 20 % bei 0,5 s Meßzeit auf über 70 % bei 10 s Meßzeit an. Hierbei ist die Länge der sowohl für das Training als auch für die Klassifizierung zur Verfügung stehenden Datenreihen gleich, d.h. die Meßzeit bezieht sich auf Training und Klassifizierung gleichermaßen.

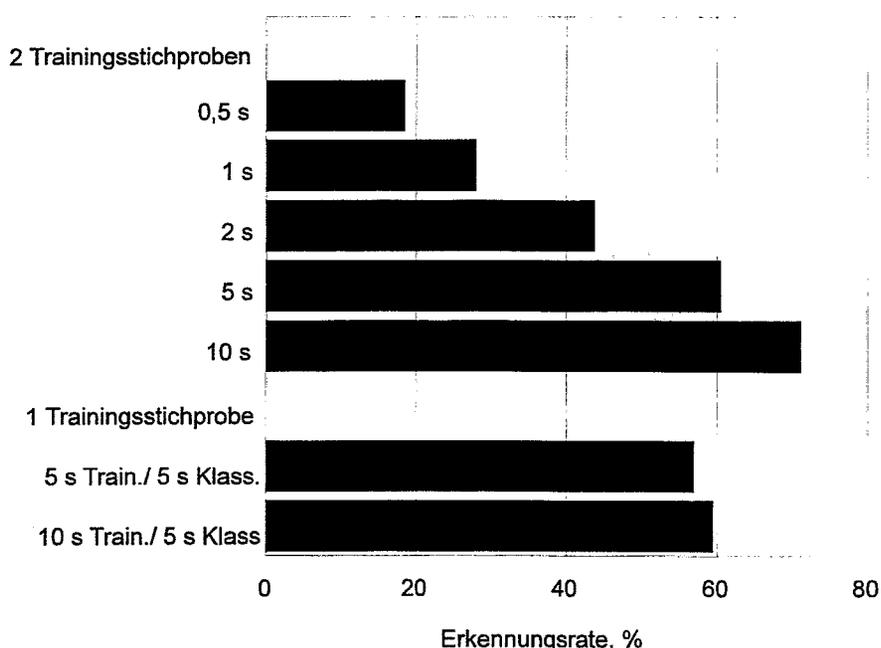


Bild 6.11 Einfluß der Meßzeit und der Anzahl der Trainingsstichproben am Beispiel des fraktalen Merkmalsextraktionsverfahrens FRC

In Bild 6.11 sind außerdem die Erkennungsraten für nur eine Trainingsstichprobe bei 5 s Meßzeit angegeben. Sie liegt um ca. 2 % unter der Erkennungsrate, die bei zwei Trainingsstichproben erzielt wird. Um sicherzustellen, daß nicht nur die Erhöhung der effektiven Meßzeit während der Trainingsphase zu diesem Effekt führt, wurde eine Klassifizierung mit einer Trainingsstichprobe und einer Meßzeit von 10 s durchgeführt, wobei in der Klassifizierungsphase unverändert mit 5 s Meßzeit gearbeitet wurde. In diesem Fall liegt die Erkennungsrate geringfügig unter der, die bei zwei Trainingsstichproben zu je 5 s Länge erreicht wird. Damit ist bewiesen, daß die Verwendung von mehr als einer Trainingsstichprobe gegenüber einer einfachen Vergrößerung der Meßzeit in der Trainingsphase einen zusätzlichen positiven Effekt hat, der jedoch nicht sehr groß ist.

6.7 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Auswahl des Mustererkennungsverfahrens

Die Untersuchungen zur Auswahl des Mustererkennungsverfahrens haben ergeben, daß das fraktale Merkmalsextraktionsverfahren FRC im Zusammenspiel mit der gepulsten Durchschallung der Rohrleitung unter Verwendung der Wellenleitersensoren aus Nishny Novgorod zu den besten Ergebnissen hinsichtlich der Erkennungsrate führt. Die höchsten Erkennungsraten werden erreicht, wenn die von der entwickelten Hardware maximal realisierbare Pulsfolgefrequenz von 3 kHz zur Anwendung kommt. Eine Filterung des primären Meßsignals vor der Merkmalsextraktion ist nicht notwendig bzw. führt zur Verringerung der Erkennungsrate.

Hinsichtlich der zur Klassifizierung verwendeten Metrik sind die Euklidische und die City-Block-Metrik etwa gleich effizient. Eine Normierung der Komponenten der Merkmalsvektoren vor Berechnung der Distanz ist nicht zweckmäßig. Letztendlich wurde die City-Block-Metrik ausgewählt, da sie meist die geringfügig höheren Erkennungsraten liefert.

Durch Anlernen von mehreren Trainingsstichproben kann die Erkennungsrate gesteigert werden. Der Zuwachs an richtig erkannten Testpunkten ist geringfügig größer, als die aus der effektiven Erhöhung der Trainings-Meßzeit erwachsende Verbesserung.

In der vorgegebenen Testmatrix von Volumenstromdichten für Wasser und Luft ist die Erkennungsrate nicht in allen Bereichen gleich hoch. Die Ergebnisse fallen im Bereich kleiner Wasser- und gleichzeitig hoher Luftvolumenströme schlecht aus (s. Bild 6.2). Die folgende Tabelle 6.2 faßt die erzielten Erkennungsraten für die gesamte Matrix und die Teilmatrix ohne den genannten Bereich nochmals zusammen. Neben der bereits in Abschnitt 6.2 genannten Erkennungsrate von 79,3 % in der Teilmatrix bei 5 s Meßzeit ist hervorzuheben, daß die überwiegende Mehrzahl der fehlerhaft klassifizierten Punkte in der unmittelbaren Nachbarschaft der vorgegebenen Testpunkte liegen. Der Anteil der stark fehlerhaften Klassifikationen (Ausreißer) liegt im Bereich unter 10 %.

Tabelle 6.2 Erkennungsraten beim fraktalen Merkmalsextraktionsverfahren, vertikale Wasser-Luft-Strömung, Signalaufnahme mit Puls-Transmissionsverfahren, Pulsfolgefrequenz 3 kHz, 2 Trainingsstichproben, City-Block-Metrik

Meßzeit	Erkennungsrate, %	Erkennungsrate Nachbarpunkte zugelassen, %	Luftdurchsatz richtig erkannt, %	Wasserdurchsatz richtig erkannt, %	$\bar{\delta}$ nach Gl. (5.13)
5 s	79,3	89,1	84,7	87,5	24,8
10 s	87,0	94,0	89,4	93,8	10,5

Bei einer für praktische Anwendungen noch akzeptablen Meßzeit von 10 s beträgt die Erkennungsrate 87 %. Weiteren 7 % der zu klassifizierenden Testpunkte wird ein trainierter Testpunkt in unmittelbarer Nachbarschaft zugeordnet. In ca. 89 % der Fälle wird die Volumenstromdichte der Luft und in ca. 94 % der Fälle die des Was-

sers richtig erkannt. Diese Raten liegen über der Gesamterkennungsrate, weil dabei zum Teil die Volumenstromdichte der jeweils anderen Phase fehlerhaft ist.

Ein Gesamtüberblick über das Klassifizierungsergebnis ist in Bild 6.12 dargestellt. Die Größe der Kästchen ist, wie in den Bildern 6.2 - 6.5, proportional zur Anzahl der richtig zugeordneten Teststichproben für die jeweiligen Volumenstromdichten. Die Pfeile geben an, welche trainierten Punkte identifiziert wurden, wenn nicht der richtige Testpunkt erkannt wurde.

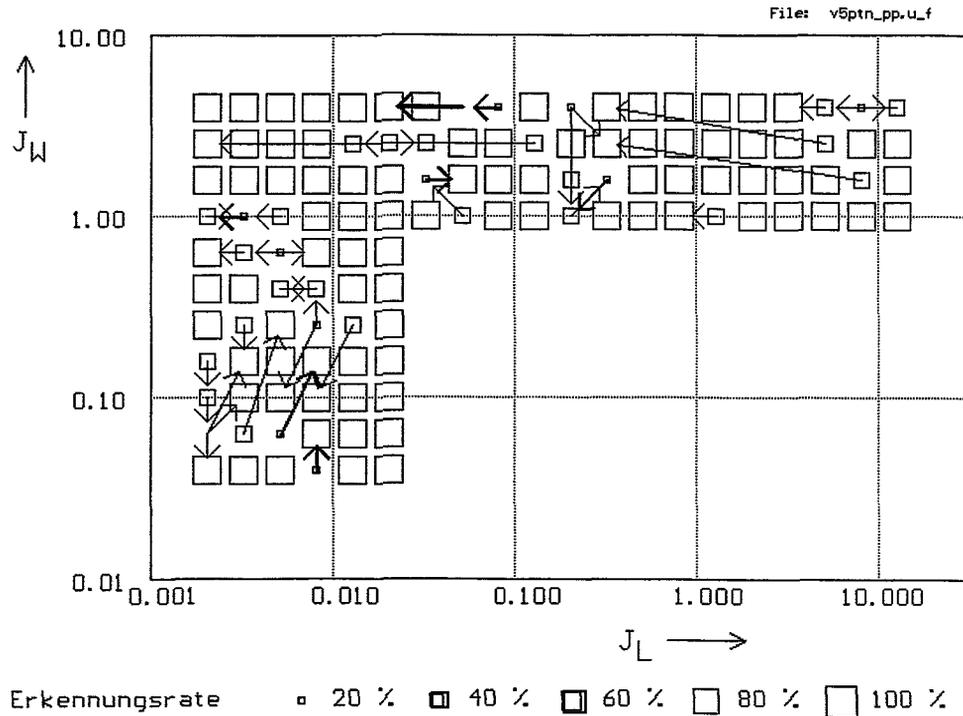


Bild 6.12 Übersicht über das Klassifizierungsergebnis mit dem fraktalen Merkmals-extraktionsverfahren FRC für die vertikale Testsektion, Durchmesser 51,2 mm, Signalgewinnung durch Puls-Transmission, 3 kHz (PTN), 2 Trainingsstichproben, Meßzeit 10 s

Pfeile: Zuordnung der fehlerhaft klassifizierten Testpunkte

An einigen Stellen in der Testmatrix werden extreme Ausreißer beobachtet, bei denen die gemessenen Volumenstromdichten um mehr als eine Größenordnung falsch sind. Bei der Verwendung des Mustererkennungsverfahrens als Strömungswächter oder als Volumenstrommeßverfahren muß eine Überwachung und Filterung hinsichtlich der Ausreißer erfolgen.

Insgesamt liegt eine mittlere relative Abweichung (Gl. 5.13) von ca. 10 % vor. Dieser Wert gibt einen Anhaltspunkt für den Meßfehler eines Volumenstrom-Meßverfahrens auf Basis der entwickelten Mustererkennungsmethode innerhalb der beiden Bereiche J_L : 0,0025 - 0,03 m/s, J_W : 0,04 - 4 m/s und J_L : 0,03 - 12 m/s, J_W : 1 - 4 m/s. In einigen Teilbereichen, die in Bild 6.12 durch eine 100 %-ig richtige Zuordnung gekennzeichnet sind, kann mit einem geringeren Meßfehler als 10 % gerechnet werden, z.B. im Bereich J_L : 0,0025 - 0,01 m/s, J_W : 1 - 4 m/s.

7 Übergang zu veränderten Randbedingungen

7.1 Ergebnisse bei verändertem Rohrlitungsdurchmesser

Für die Untersuchung des Einflusses des Rohrlitungsdurchmessers stehen 4 Serien von Testdaten zur Verfügung, die ohne Ausnahme bei Atmosphärendruck (1 bar) und Normaltemperatur (20 - 25 °C) aufgenommen wurden:

Tabelle 7.1 Testserien bei Variation des Rohrlitungsdurchmessers

Abk.	Sensoren	Betriebsart	Puls- bzw. Wobbel- frequenz	Abtast- frequenz	Gesamt- meßzeit	Rohrrinnen- durch- messer
V3KT	LNA-4	kont. Transm.	1 kHz	1 kHz	150 s	29 mm
V8KT	LNA-4	kont. Transm.	1 kHz	1 kHz	150 s	81 mm
V3PE	Wellenleiter	Puls-Echo	600 Hz	2 kHz	75 s	29 mm
V3PT	Wellenleiter	Puls-Transm.	600 Hz	2 kHz	75 s	29 mm

Die zur Verfügung stehende Gesamtmeßzeit wurde in 15 Stichproben je Meßpunkt aufgeteilt. Die Stichproben waren stets 10000 Werte lang, die Meßzeit je Stichprobe betrug 10 s für die Serien V3KT und V8KT sowie 5 s für die Serien V3PE, V3PT, V8PE und V8PT.

Bei den Testserien wurde dieselbe Volumenstrommatrix verwendet, wie bei den Messungen an der Rohrlitung mit 51,2 mm Durchmesser. Beim Übergang zu veränderten Rohrlitungsdurchmessern ist zu beachten, daß sich bei gleichen Volumenströmen die Volumenstromdichten der Testpunkte umgekehrt proportional zum Quadrat des Innendurchmessers verhalten:

$$J = J_0 \cdot \left(\frac{d_{i,0}}{d_i} \right)^2 \quad (7.1)$$

Bei einem Durchmesser von 29 mm sind deshalb alle Testpunkte zu höheren Volumenstromdichten hin verschoben. Es bestätigte sich, daß das fraktale Merkmalsextraktionsverfahren FRC die besten Erkennungsraten liefert. Lediglich die Kombination des linearen Vorhersagemodells VLN mit dem Puls-Echo-Verfahren PE ergab eine um ca. 2 % höhere Erkennungsrate, als die Anwendung des Verfahrens FRC auf die PE-Daten. Das Klassifizierungsergebnis ist für 10 s Meßzeit in Bild 7.1 in Abhängigkeit vom Signalgewinnungsverfahren dargestellt.

Die höchste Erkennungsrate (ca. 63 %) wurde bei der gepulsten Durchschallung (PT) mit Wellenleitersensoren erreicht. Messungen mit den Wellenleitersensoren wurden nur bei einem Durchmesser von 29 mm durchgeführt. Die Erkennungsrate liegt wenige Prozent unter der, die bei 51,2 mm Durchmesser erzielt wurde. Die kontinuierliche Durchschallung mit den Hochtemperaturaufnehmern LNA-4 liefert Erkennungsraten um 50 % für alle drei Durchmesser.

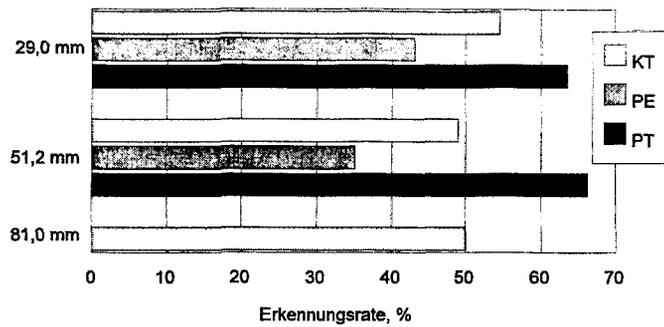


Bild 7.1 Ergebnis der Klassifizierung mit dem fraktalen Verfahren FRC in Abhängigkeit vom Durchmesser der vertikalen Rohrleitung, Meßzeit 10 s, 2 Trainingsstichproben

Die Verteilung der Erkennungsrate über die Testmatrix für das gepulste Durchschallungsverfahren (PT) an der Rohrleitung mit 29 mm Durchmesser ist in Bild 7.2 dargestellt. Es zeichnen sich weite Bereiche der Volumenstromdichten ab, in denen die Erkennungsrate schlecht ist (grau hinterlegter Bereich).

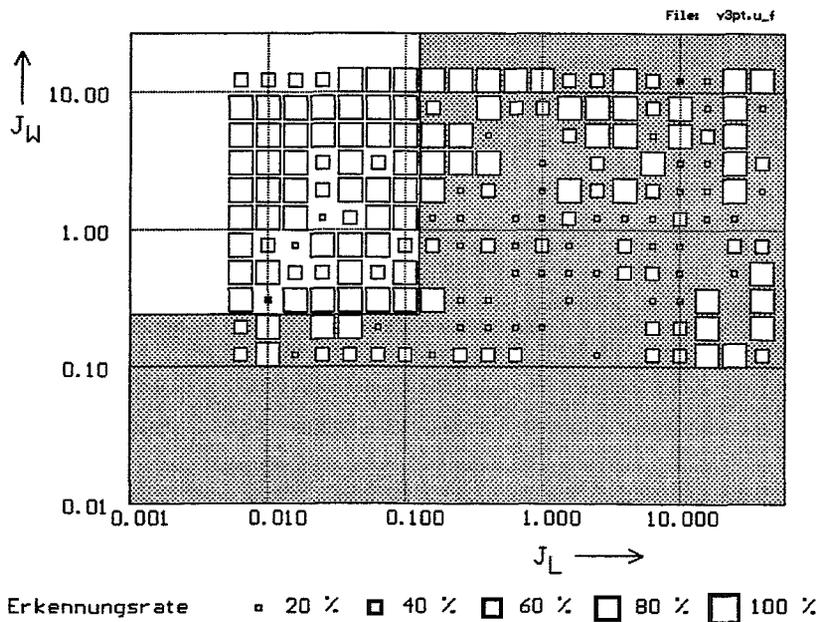


Bild 7.2 Klassifizierungsergebnis in der 29 mm-Leitung, fraktales Verfahren, Puls-Transmission

Im eingeschränkten Bereich von $J_w > 0.3$ m/s und $J_L < 0.1$ m/s steigt die Gesamterkennungsrate auf 91 % an, wobei bei weiteren 6 % der Testpunkte einer der Nachbarnpunkte erhalten wurde. Der berechnete maximale relative Fehler beträgt 6,7 %. Die Klassifizierungsergebnisse sind in Tabelle 7.2 zusammengefaßt. In Bild 7.3 ist die Verteilung der Erkennungsrate innerhalb des eingeschränkten Anwendungsbereichs detailliert dargestellt.

Tabelle 7.2 Erkennungsraten beim fraktalen Merkmalsextraktionsverfahren, vertikale Wasser-Luft-Strömung, Durchmesser 29 mm, Signalaufnahme mit Puls-Transmissionsverfahren, Pulsfrequenz 600 Hz, 2 Trainingsstichproben, City-Block-Metrik

Bereich	Erkennungsrate, %	Erkennungsrate Nachbarpunkte zugelassen, %	Luftdurchsatz richtig erkannt, %	Wasserdurchsatz richtig erkannt, %	$\bar{\delta}$ nach Gl. (5.13)
ges.	63,4	79,4	74,5	72,7	115,3
Teil	91,0	96,8	91,0	98,4	6,7

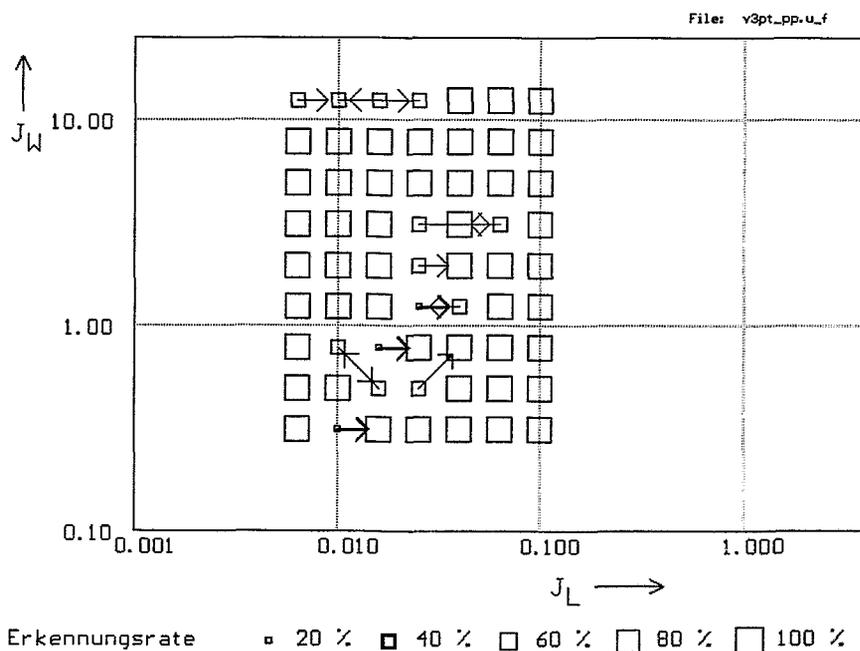


Bild 7.3 Klassifizierungsergebnis an der 29 mm-Leitung innerhalb des eingeschränkten Volumenstrombereichs (Pfeile - Zuordnung der Fehlklassifizierungen)

Bei der Messung an der 81 mm-Leitung stand nur das kontinuierliche Durchschalungsverfahren zur Verfügung. Die Verteilung der Erkennungsraten innerhalb der Volumenstrommatrix weist stärkere Inhomogenitäten auf (Bild 7.4). Die Erkennungsraten nehmen in Richtung auf höhere Wasserdurchsätze zu. Ein deutlich abgegrenzter Bereich mit sehr guten Ergebnissen kann nicht identifiziert werden.

Für eine praktische Anwendung eines Meßverfahrens auf Basis der Mustererkennung wäre eine Flexibilität hinsichtlich der Variation von Randbedingungen wünschenswert. Aus diesem Grund wurde versucht, einen mit Daten aus der 51,2 mm-Rohrleitung trainierten Mustererkennungsalgorithmus zur Klassifizierung der Signale von der 29 mm-Leitung anzuwenden. Hierbei wurde berücksichtigt, daß Testpunkte mit der gleichen Nummer infolge der Durchmesseränderung innerhalb der Volumenstromdichtematrix (Gl. 7.1) verschoben werden. Im Ergebnis der Untersuchungen muß festgestellt werden, daß eine Übertragbarkeit hinsichtlich einer Verände-

zung des Rohrleitungsdurchmessers nicht besteht. Selbst innerhalb eines Ausschnitts der Testmatrix, in dem die Klassifizierung der beiden einzelnen Datensätze zu sehr guten Erkennungsraten führt, werden beim Übergang zum kleineren Durchmesser alle Testpunkte falsch zugeordnet.

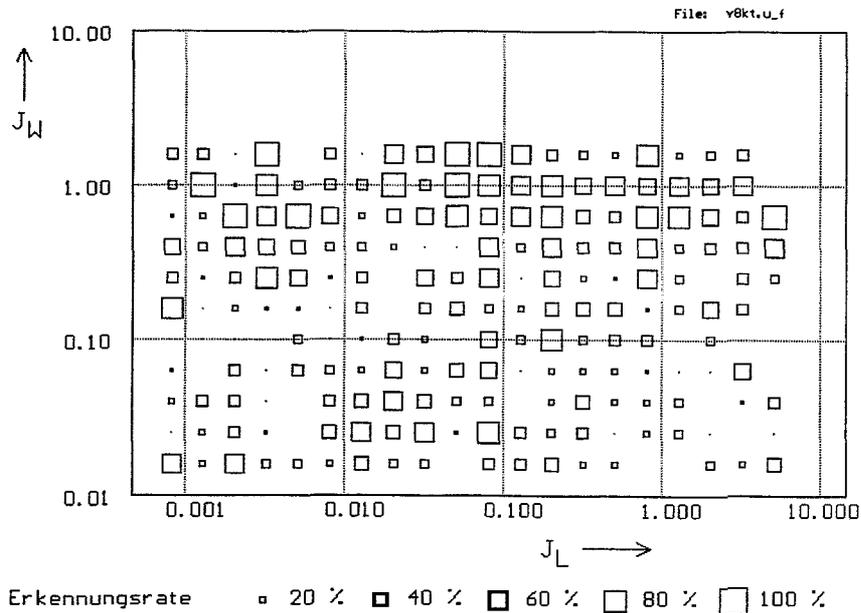


Bild 7.4 Verteilung der Erkennungsrate innerhalb der Volumenstrommatrix in der 81 mm-Leitung, Merkmalsextraktion FRC, kontinuierlicher Transmissionsbetrieb (KT)

7.2 Einfluß der Temperatur des Strömungsmediums

An der vertikalen Rohrleitung mit 51,2 mm Innendurchmesser wurde mit den Wellenleitersensoren im Pulsbetrieb eine Meßreihe mit erhöhter Temperatur (75 - 80 °C) durchgeführt. Dabei wurden die folgenden beiden Meßserien aufgenommen:

Tabelle 7.3 Testserien mit erhöhter Temperatur

Abk.	Sensoren	Betriebsart	Puls- bzw. Wobbel- frequenz	Abtast- frequenz	Gesamt- meßzeit	Rohrinnen- durch- messer
V5PE_T	Wellenleiter	Puls-Echo	600 Hz	2 kHz	75 s	51,2 mm
V5PT_T	Wellenleiter	Puls-Transm.	600 Hz	2 kHz	75 s	51,2 mm

Wie Bild 7.5 zeigt, liefert auch bei der erhöhten Temperatur erwartungsgemäß wieder das fraktale Verfahren in Kombination mit der gepulsten Durchschallung die besten Erkennungsraten.

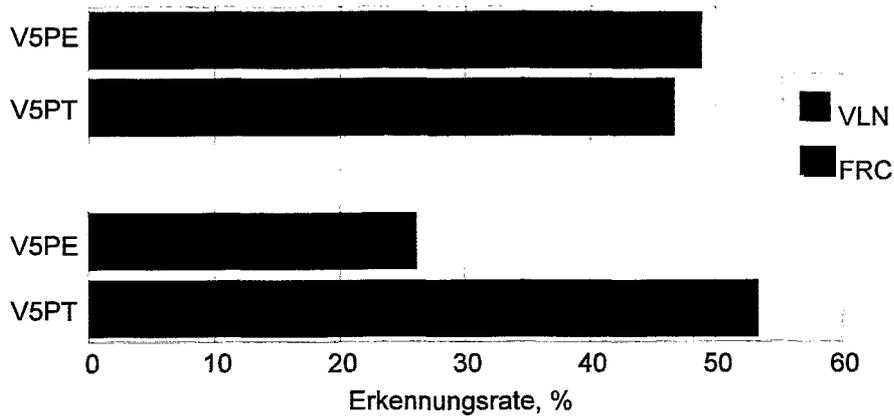


Bild 7.5 Erkennungsrate an der vertikalen Rohrleitung bei erhöhter Temperatur, Meßzeit 5 s, Trainingsstichproben: 2

Zur Untersuchung der Übertragbarkeit wurde versucht, das bei 20 - 25 °C trainierte Verfahren (FRC) zur Klassifizierung der Meßdaten bei 75 - 80 °C heranzuziehen. Ausgewählte Punkte aus der Meßreihe bei erhöhter Temperatur, bei denen mit dem bei gleicher Temperatur trainierten Mustererkennungsverfahren gute Erkennungsrate auftraten, wurden der Klassifizierung anhand eines bei Normaltemperatur trainierten Verfahrens unterzogen.

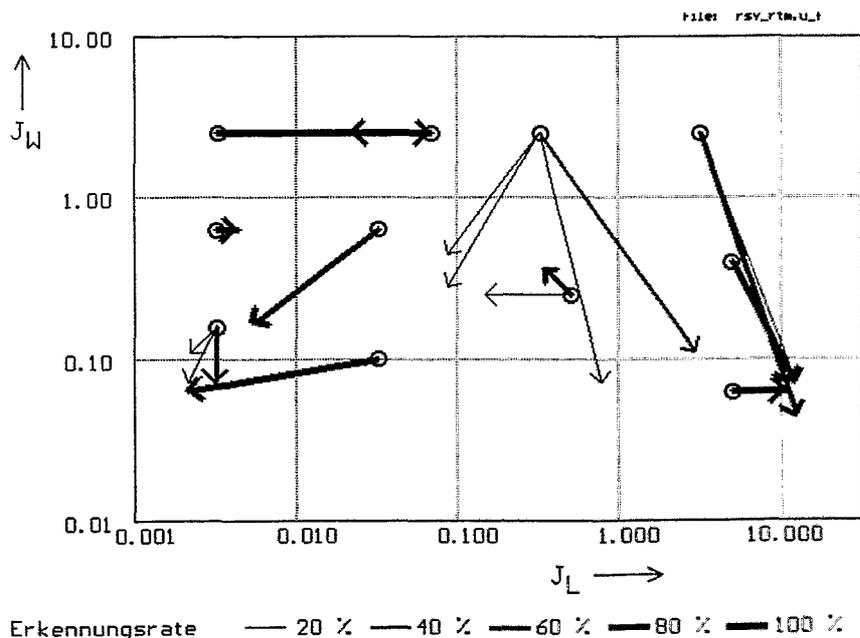


Bild 7.6 Zuordnung der Testpunkte bei erhöhter Temperatur zu Trainingsstichproben aus Messungen bei Normaltemperatur

Wie in Bild 7.6 zu erkennen ist, besteht keine sinnvolle Zuordnung der Testpunkte. Die Erkennungsrate beträgt innerhalb der gesamten Testmatrix nur 2,4 % (vgl. Tabelle 7.4). Durch die Erhöhung der Temperatur ist die tatsächliche Volumenstromdichte in der Testsektion höher, als die nominelle, die sich aus der Luftzuspeisung ergibt. Die Zunahme setzt sich aus der isobaren Ausdehnung der Luft infolge Erwärmung im Kontakt mit dem aufgeheizten Wasser und der Bildung von Wasserdampf entsprechend dem für die erhöhte Temperatur geltenden Partialdruck zusammen. Die Testpunkte bei erhöhter Temperatur müßten deshalb bei der Klassifizierung einer erhöhten Gasvolumenstromdichte bei 20 °C zugeordnet werden, was sich in Bild 7.6 als horizontaler, nach rechts gerichteter Pfeil äußern müßte.

Dieses Verhalten wird nicht beobachtet. Die Zuordnung hat vielmehr einen vollkommen ungeordneten Charakter. Eine Übertragbarkeit der Merkmalsvektoren bei Veränderung der Temperatur ist folglich nicht gegeben. Diese Aussage gilt auch für die nicht dargestellten Ergebnisse, die mit den Verfahren DTE und VLN erhalten wurden. Die Ursache liegt in der Beeinflussung des Strömungsmusters durch die Änderung der temperaturabhängigen Stoffwerte des Strömungsmediums.

7.3 Messung bei veränderlichen Stoffwerten durch Erweiterung der Menge der zugeordneten Strömungsparameter

Bei den meisten potentiellen praktischen Anwendungen muß das Meßverfahren innerhalb eines bestimmten Druck- und Temperaturbereichs funktionieren. Nachdem eine Übertragbarkeit der Merkmalsvektoren schon bei einer relativ geringfügigen Änderung der Temperatur nicht gegeben ist, kann die Erweiterung des Bereichs der Stoffparameter nur durch eine Erweiterung des Trainingsumfangs erreicht werden. Um z.B. eine Änderung der Temperatur beherrschen zu können, muß die Menge der den Merkmalsvektoren zugeordneten Strömungsparameter um die Temperatur als Eingabewert erweitert werden. Es ergeben sich dann drei Parameter, die in der Trainingsphase in dem für die Messung gewünschten Gültigkeitsbereich unabhängig voneinander variiert werden müssen: (1) die Volumenstromdichte des Gases, (2) die Volumenstromdichte des Wassers und (3) die Temperatur.

Im folgenden wurde untersucht, inwiefern ein mit Datensätzen für beide Temperaturen, d.h. 20 - 25 °C und 75 - 80 °C trainiertes Mustererkennungsverfahren die Testdaten für beide Temperaturen zuordnet. Dabei wurde das fraktale Merkmalsextraktionsverfahren FRC mit einer Meßzeit von 15 s verwendet. Die folgende Tabelle 7.4 faßt die Ergebnisse zusammen:

Tabelle 7.4 Erweiterung der Trainingsstichproben um den Parameter Temperatur (Verfahren FRC / PT, Meßzeit 15 s, 20 °C = V5PT, 80 °C = V5PT_T)

Trainingsstichproben	klassifizierte Stichproben	Erkennungsrate (Volumenstromdichten und ggf. Temperatur richtig)	richtige Temperatur erkannt	richtige Volumenstromdichten aber falsche Temperatur erkannt
20 °C, 80 °C	80 °C	60,4 %	94,0 %	0 %
20 °C, 80 °C	20 °C	60,5 %	95,5 %	0 %
20 °C	20 °C	64,2 %	-	-
80 °C	80 °C	62,3 %	-	-
20 °C	80 °C	2,4 %	-	-

Es zeigt sich, daß etwa 95 % der Testpunkte hinsichtlich der Temperatur richtig klassifiziert werden. Die Zuordnung der Volumenstromdichten ist in diesen Fällen vergleichbar mit den Ergebnissen, die erreicht werden, wenn Trainings- und Klassifizierungsstichproben mit derselben Temperatur verwendet werden. Die Verteilung der Erkennungsrate innerhalb der Volumenstrommatrix ist in den Fällen mit richtiger Zuordnung der Temperatur fast identisch mit den für eine konstante Temperatur erhaltenen Ergebnissen (vgl. Bilder 6.2 und 7.2). Wenn die Temperatur nicht richtig klassifiziert wird, so ist auch die Zuordnung der Volumenstromdichten falsch, wobei

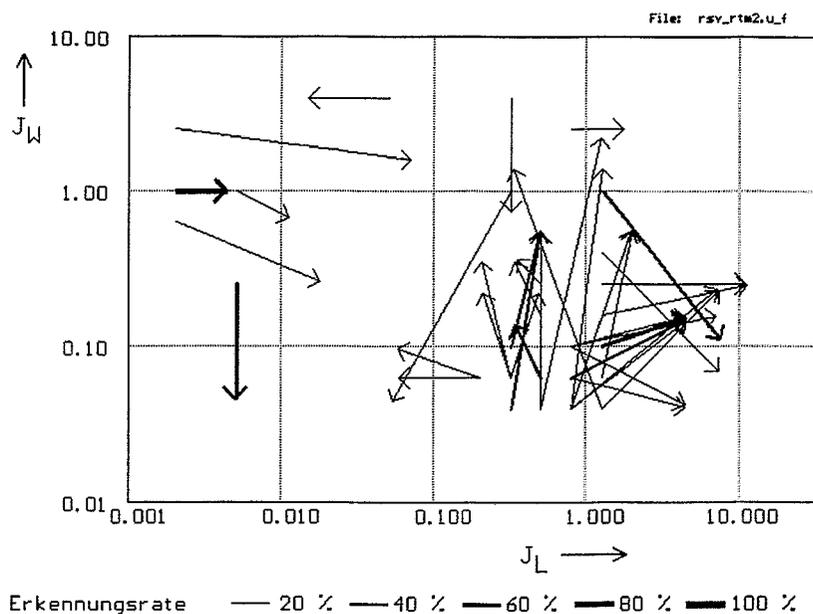


Bild 7.7 Zuordnung der Testpunkte aus der Serie V5KT_T zu den Trainingstestpunkten, wenn die Temperatur falsch klassifiziert wurde (nur 6 % der klassifizierten Punkte!)

die Abweichungen den Charakter von Ausreißern tragen (Bild 7.7).

Das Ergebnis läßt den Schluß zu, daß die Erweiterung des Parameterbereichs möglich ist. Sie ist jedoch mit einer extremen Vergrößerung des Trainingsaufwandes verbunden. Dieser Weg kann nur dann beschritten werden, wenn ein nicht zu umfangreicher, genau abgegrenzter Meßbereich vorliegt, wie etwa bei der Verwendung des Verfahrens als Meßglied in Regelkreisen oder bei der Überwachung von Abweichungen vom Nennbetrieb einer Anlage. Eine Kalibrierung des Verfahrens für eine Anwendung bei experimentellen Messungen wird in der Regel einen unverhältnismäßig hohen Trainingsaufwand bedingen.

8 Zweiphasenströmung Wasser-Luft in horizontalen Rohrleitungen

8.1 Testdaten

Die Untersuchungen wurden an der horizontalen Rohrleitungssektion der Zweiphasen-Testschleife durchgeführt. Hierbei stand nur ein Rohrleitungsdurchmesser (51,2 mm, zur Verfügung. Die Datensätze wurden ausnahmslos mit dem kontinuierlichen Durchschallungsverfahren mit Frequenzwobbelung (KT) aufgezeichnet, bei den Sensoren handelte es sich stets um die Hochtemperaturlaufnehmer vom Typ LNA-4. Die Meßfrequenz betrug 1 kHz, sie war identisch mit der Wobbelfrequenz. Aufgezeichnet wurden je 5 Datensätze mit einer Länge von 30000 Werten. Daraus wurden je Testpunkt 15 Stichproben mit einer Länge von je 10000 Werten gebildet, d.h. bei Training und Klassifikation wurde mit einer Meßzeit von 10 s gearbeitet. Diese eingrenzende Entscheidung wurde getroffen, weil eine größere Variantenbreite den zur Verfügung stehenden Zeitrahmen bei weitem gesprengt hätte.

An der horizontalen Rohrleitung bestehen zwei grundlegende Möglichkeiten für die Ankopplung der Ultraschallaufnehmer: Die Durchschallung der Rohrleitung kann sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung erfolgen. Die beiden Varianten führen zu Signalen mit unterschiedlichem Informationsgehalt, so daß sich auch die erreichbaren Erkennungsraten deutlich unterscheiden. Dieser Effekt wurde in die Variantenuntersuchungen einbezogen.

Neben den Messungen bei Normaltemperatur und zur Umgebung hin offenen Schleife wurden Datensätze auch bei Luftbetrieb mit erhöhtem Druck bzw. mit erhöhter Temperatur aufgenommen. Es wurde dieselbe Volumenstrom-Testmatrix abgefahren, wie bei den Messungen an der vertikalen Testsektion. Für die Lufteinspeisung wurde einmal die Einspeisevorrichtung in der vertikalen Testsektion (Einspeiseort unten), ein andermal die in der horizontalen Testsektion (Einspeiseort oben) betrieben. Der Vergleich zwischen den bei diesen beiden Varianten aufgezeichneten Daten dient zur Untersuchung des Einflusses der Einlaufstrecke. Die folgende Tabelle faßt die zur Verfügung stehenden Daten zusammen:

Tabelle 8.1 Meßserien an der horizontalen Testsektion bei Luft-Wasser-Betrieb

Abk.	Durchschallung	Einspeiseort	Druck	Temperatur
H5KTVO	vertikal	oben	1 bar	20 - 25 °C
H5KTHO	horizontal	oben	1 bar	20 - 25 °C
H5KTUV	vertikal	unten	1 bar	20 - 25 °C
H5KTHU	horizontal	unten	1 bar	20 - 25 °C
H5KTVO P	vertikal	oben	3 bar	20 - 25 °C
H5KTHO P	horizontal	oben	3 bar	20 - 25 °C
H5KTUV T	vertikal	unten	1 bar	75 - 80 °C
H5KTHU T	horizontal	unten	1 bar	75 - 80 °C

8.2 Erkennungsraten

Die Erkennungsraten für die Meßreihen bei Normalbedingungen sind in Bild 8.1 dargestellt. In allen Fällen liefert das fraktale Verfahren die besten Ergebnisse, wobei

die Erkennungsrate bei einer Meßzeit von 10 s in der Größenordnung von 40 - 45 % liegt. Von den beiden Varianten der Ausrichtung des Ultraschallstrahls erweist sich die horizontale Durchschallung als geringfügig günstiger.

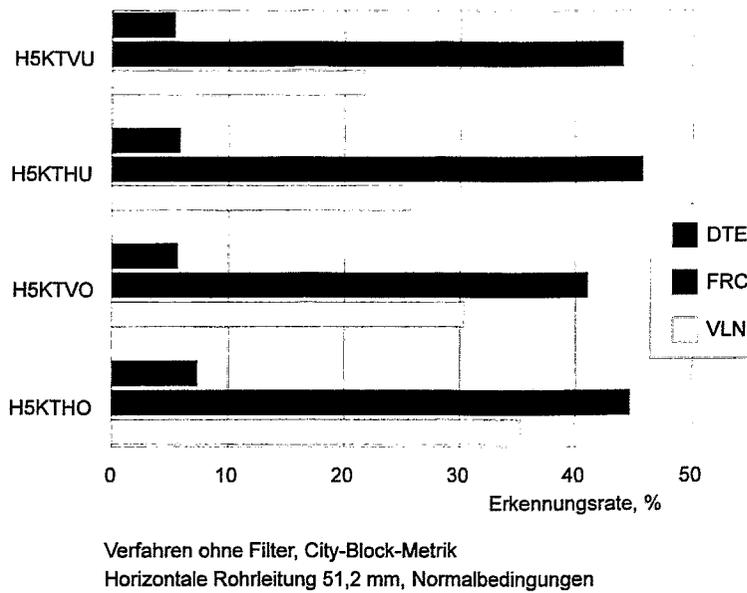


Bild 8.1 Erkennungsraten bei der kontinuierlichen Durchschallung (KT) der horizontalen Rohrleitung, Meßzeit 10 s

Die Verteilung der Erkennungsrate (Bild 8.2) weist eine deutliche Zunahme im Bereich höherer Wasservolumenströme auf. Sowohl bei der vertikalen als auch bei der horizontalen Durchschallung sind die Erkennungsraten im Bereich $J_L > 0,1$ m/s und $J_W > 0,6$ m/s am höchsten.

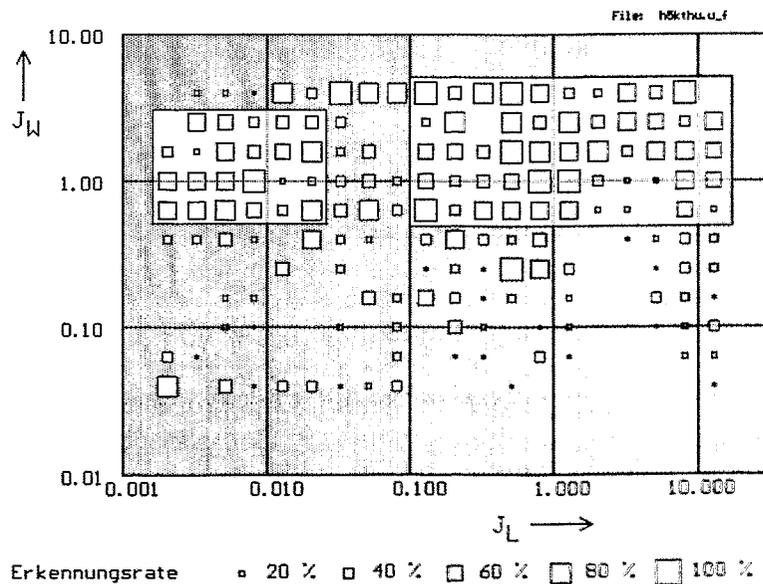


Bild 8.2 Verteilung der Erkennungsrate innerhalb der Volumenstrommatrix, horizontale Transmission der horizontalen Rohrleitung, Verfahren FRC / KT, Meßzeit 10 s (grau hinterlegt: Bereiche mit niedrigerer Erkennungsrate)

Eine zweite Region mit guten Erkennungsraten liegt bei kleinen Luftvolumenströmen (siehe Bild 8.2). Die Verteilungen selbst sind bei allen Datensätzen sehr ähnlich, auch was die beiden Einspeiseorte betrifft. Stellvertretend für alle anderen Ergebnisse wurde deshalb in Bild 8.2 nur die Verteilung der Erkennungsrate für die horizontale Durchschallung bei Betrieb der unteren Einspeisevorrichtung dargestellt.

8.3 Einfluß der Einlauflänge

Bei den Messungen an der horizontalen Testsektion stand eine Einlauflänge von ca. 1,2 m, d.h. 24 L/D zur Verfügung. Die Einlauflänge ist gerechnet vom oberen Einspeiseort bis zur Position der Aufnehmer. Die Durchführung von Messungen mit beiden Einspeisevorrichtungen macht es möglich, den Grad der Annäherung an eine ausgeprägte Rohrströmung zu studieren. Wenn die Einlauflänge ausreicht bzw. wenn sich bei ausreichend großer Einlauflänge eine ausgeprägte Strömungsstruktur einstellt, die sich im weiteren Verlauf nicht mehr ändert, so muß dies für beide Einspeiseorte zu einer identischen Ausprägung der Strömungsstruktur am Meßort führen. In diesem Fall müßte eine enge Korrelation zwischen den Signalen bestehen, die bei Einspeiseort oben und bei Einspeiseort unten aufgenommen wurden.

Zum Zweck der Überprüfung wurde das Mustererkennungsverfahren mit den Signalen der Serie H5KTHU trainiert und anschließend die Testserie H5KTHO zur Klassifizierung vorgegeben. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

Tabelle 8.2 Ergebnis der Untersuchung der Übertragbarkeit bei Veränderung der Einlaufbedingungen, Verfahren FRC / KT, Meßzeit 30 s

Einspeiseort der Trainingsstichproben	Einspeiseort der klassifizierten Stichproben	Erkennungsrate	Erkennungsrate mit Nachbarpunkten	Einspeiseort richtig erkannt
unten	unten	60,1 %	73,0 %	-
oben	oben	52,6 %	68,5 %	-
unten	oben	1,1 %	4,7 %	-
unten, oben	unten	55,4 %	67,7 %	90,8 %

Wenn Training und Klassifizierung mit Daten vorgenommen werden, die bei unterschiedlichem Einspeiseort aufgenommen wurden, liegt die Erkennungsrate trotz maximal möglicher Meßzeit von 30 s nur bei 1,1 %. Auch bei Einbeziehung der Nachbarpunkte in die Bilanzierung ergeben sich nur 4,7 % richtige Zuordnungen. Damit ist erwiesen, daß sich innerhalb einer Einlauflänge von $L/D = 24$ keine reproduzierbaren Strömungsbedingungen einstellen. Eine größere Einlauflänge der horizontalen Rohrleitung konnte an der bestehenden Zweiphasentestschleife aus baulichen Gründen nicht realisiert werden.

Wenn, wie bei der Variation der Temperatur an der vertikalen Testsektion, das Mustererkennungsverfahren mit Daten beider Einspeisevarianten trainiert wird, ist ein gutes Klassifizierungsergebnis möglich. Der richtige Einspeiseort wird in ca. 90 % aller Fälle identifiziert. Dies deutet ebenfalls darauf hin, daß die beiden Einspeisevarianten bei ansonsten identischen Bedingungen zu gravierenden Unterschieden der

Strömungsstruktur führen und daß die Einlaufstrecke für die Herausbildung einer reproduzierbaren Strömungsstruktur nicht ausreicht.

8.4 Luftbetrieb mit erhöhtem Druck bzw. erhöhter Temperatur

Diese Meßreihen wurden speziell für die Untersuchung der Übertragbarkeit von Merkmalsvektoren bzw. trainierten Mustererkennungsverfahren auf Zustände mit veränderten thermodynamischen Randbedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, wie dies auch bei der Temperaturerhöhung an der vertikalen Testsektion der Fall war, daß die Übertragbarkeit mit den bisher entwickelten und getesteten Merkmalsextraktionsverfahren nicht gegeben ist. Zur Illustration ist im folgenden Bild 8.3 das Ergebnis der Klassifizierung einiger ausgewählter Testpunkte aus der Meßreihe H5KTHU_T (s. Tabelle 8.1) mit dem anhand der Daten H5KTHU trainierten fraktalen Verfahren (FRC) dargestellt.

Es ergibt sich eine weitgehend zufällige Zuordnung von Trainings- und Klassifizierungstestpunkten, so daß aus Gründen der Übersichtlichkeit nur einige wenige Zuordnungen graphisch dargestellt wurden. Als Fazit muß festgestellt werden, daß eine Anwendung der Mustererkennung zur Messung der Volumenstromdichten bei veränderlichen thermodynamischen Randbedingungen bzw. Stoffwerten die Berücksichtigung der entsprechenden Parameterbereiche in der Trainingsphase erfordert (vgl. Abschnitt 7.3).

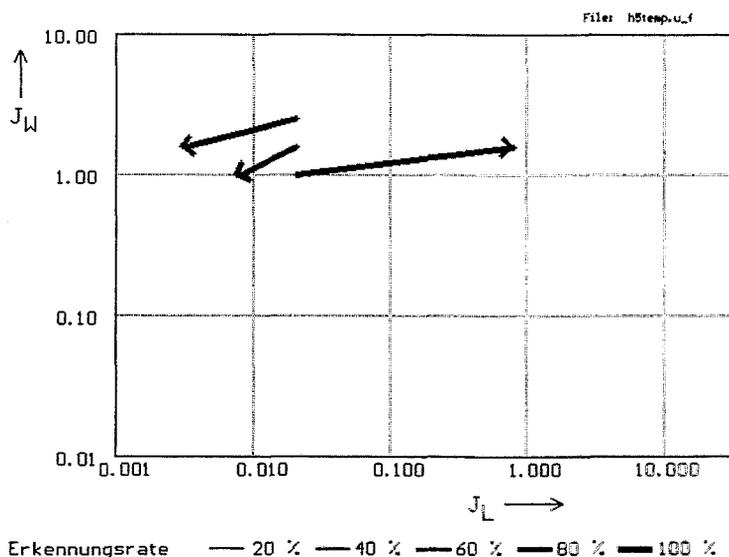


Bild 8.3 Ergebnis der Zuordnung von drei Testpunkten aus der Serie H5KTHU_T (erhöhte Temperatur) zu den Trainigdsdaten H5KTHU (Normaltemperatur)

9 Automatische Aufstellung von Strömungskarten durch unüberwachtes Lernen (Clustering)

9.1 Grundlagen

In Bild 9.1 ist die mittlere Amplitude und die Standardabweichung des Ultraschall-Transmissionssignals in Abhängigkeit von den Volumenstromdichten von Luft und Wasser dargestellt (vertikale Rohrleitung von 51,2 mm Durchmesser). Der untersuchte Bereich der Volumenstromdichten erscheint deutlich strukturiert. Es tritt eine gewisse Ähnlichkeit zu bekannten Strömungskarten in Erscheinung. Ausgehend von diesem visuellen Eindruck wurde vermutet, daß sich die Merkmalsvektoren, die aus den Ultraschall-Transmissionssignalen gewonnen werden, zu Gruppen zusammenfassen lassen, die mit charakteristischen Strömungsformen korrelieren. Zur Prüfung dieser These wurde die Methode des unüberwachten Lernens verwendet.

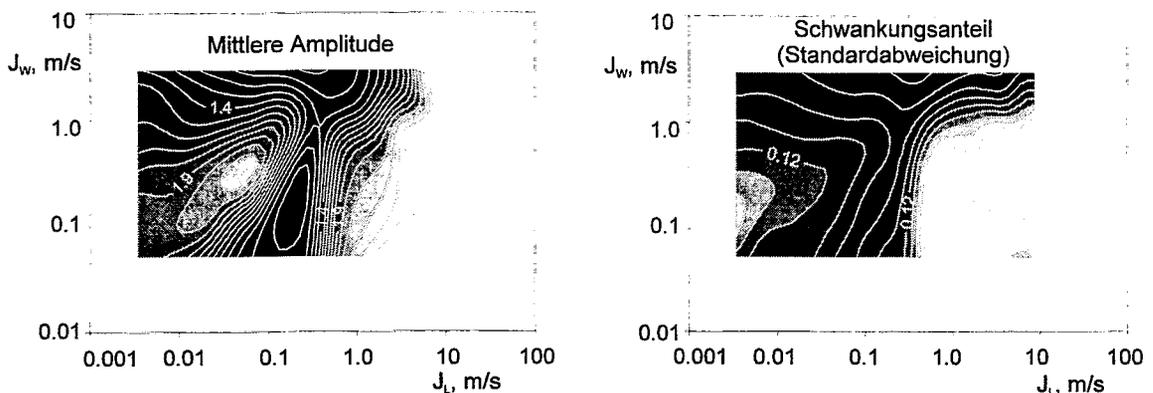


Bild 9.1 Abhängigkeit der mittleren Amplitude und der Standardabweichung der Amplitude des Ultraschall-Transmissionssignals (kontinuierliche Transmission, KT) von den Volumenstromdichten von Luft und Wasser in der vertikalen Rohrleitung von 51,2 mm Durchmesser

Unüberwacht bedeutet, daß dem Mustererkennungsalgorithmus die den Trainingsstichproben zugeordneten Strömungsparameter nicht zur Verfügung gestellt werden. In unserem Fall sind dies die Volumenstromdichten der beiden strömenden Phasen. In der Trainingsphase können somit nur Merkmalsvektoren gebildet und abgespeichert werden, es kann jedoch keine Zuordnung zu Meßgrößen, d.h. den Volumenstromdichten, vorgenommen werden. Die beim Training gebildete Datenbank von Merkmalsvektoren enthält keine a-priori vorgegebene Information über die Strömung, die aus einer anderen Quelle stammt als aus dem primären Meßsignal.

Unter Anwendung einer konkreten Metrik können jedoch Distanzen zwischen je zwei der gespeicherten Merkmalsvektoren ermittelt werden. Eine kleine Distanz deutet auf eine qualitative Ähnlichkeit der zugrundeliegenden Strömungszustände hin, eine große Distanz auf qualitative Unterschiede. Eine Untermenge von Merkmalsvektoren, die sogenannte Gruppe, kann hinsichtlich der Ähnlichkeit der einbezogenen Strömungszustände durch die Varianz charakterisiert werden:

$$E_G = \frac{1}{n_M} \sum_{i \in G} \sum_{j=1}^{n_M} (m_{i,j} - \bar{m}_j)^2 \quad (9.1)$$

Hierbei ist n_M die Dimension der Merkmalsvektoren, G die konkrete Gruppe, $m_{i,j}$ die j -te Komponente des i -ten Merkmalsvektors aus der Gruppe G und \bar{m}_j die j -te Komponente des Schwerpunkts der Gruppe. Letzterer berechnet sich als arithmetischer Mittelwert der insgesamt n_G Merkmalsvektoren der Gruppe:

$$\bar{m}_j = \frac{1}{n_G} \sum_{i \in G} m_{i,j} \quad (9.2)$$

Eine konkrete Unterteilung der zur Verfügung stehenden Menge von Merkmalsvektoren in Gruppen (Untermengen) wird als Partition bezeichnet. Das sogenannte Clustering besteht in der Ermittlung der Partition, bei der in den einzelnen Gruppen möglichst ähnliche Strömungszustände, d.h. Merkmalsvektoren mit möglichst geringer Distanz zueinander zusammengefaßt sind. Wenn P die Anzahl der Gruppen ist, so ist das anzuwendende Kriterium für das optimale Clustering das Minimum der Gesamtvarianz der Partition:

$$E = \sum_{G=1}^P E_G \rightarrow \text{MIN}\{\Pi\} \quad (9.3)$$

wobei Π die Menge aller möglichen Partitionen, d.h. Unterteilungen in Gruppen ist. Die Ermittlung der optimalen Partition ist ein aufwendiger Optimierungsprozeß. Zu Beginn ist weder die optimale Aufteilung in Gruppen noch die optimale Anzahl der Gruppen selbst bekannt. Zur Ermittlung der Anzahl der formalen Gruppen wird die Abnahme der Gesamtvarianz der optimalen Partition bei Erhöhung der Gruppenanzahl analysiert. Die Gesamtvarianz ist eine monoton fallenden Funktion der Gruppenanzahl. Die Abnahme der Gesamtvarianz ist jedoch bei der Erhöhung der Gruppenanzahl nicht gleichmäßig hoch. Bei einer bestimmten Gruppenanzahl kommt es zu einer deutlichen Verminderung der abfallenden Tendenz. An diesem Punkt wird die weitere Vergrößerung der Gruppenanzahl abgebrochen, da davon ausgegangen wird, daß eine weitere Unterteilung in Gruppen zu keinem wesentlichen Informationszuwachs mehr führt.

Das Ergebnis des Optimierungsprozesses besteht in einer formalen Partition der Trainingsmuster. Die Gruppen entsprechen qualitativ ähnlichen Strömungszuständen. Eine Zuordnung von linguistischen Variablen, d.h. Begriffen, die die Strömungsform charakterisieren, kann jedoch nicht erfolgen.

Im Grunde ist auch die Aufstellung von Strömungskarten durch visuelle Beobachtung ein ähnlicher Prozeß. Der Beobachter bemerkt, daß in den Signalen, die er wahrnimmt, d.h. im äußeren Erscheinungsbild der Strömung, bei bestimmten Grenzwerten der Volumenstromdichten gravierende qualitative Veränderungen auftreten. Auf diese Weise entstehen Gruppen von einzelnen Strömungszuständen, die durch ein ähnliches äußeres Erscheinungsbild gekennzeichnet sind. Im nächsten Schritt werden den Gruppen Namen zugeordnet, die bestimmte Besonderheiten der Strömungsform anhand von Analogien charakterisieren. Diese Begriffsbildung stellt Parallelen zu anderen Wissensbereichen her. So entstammt z. B. der Begriff

„Pfropfenströmung“ aus der Analogie der dabei auftretenden Großblasen zu Pfropfen, die zum Verschließen von Rohrleitungen oder Behältern dienen. Solche Analogien können beim automatischen Clustering nicht gebildet werden, da das Mustererkennungsverfahren nicht über Wissen verfügt.

Das unüberwachte Lernen liefert lediglich eine aus Gruppen bestehende Partition, innerhalb derer die Strömungszustände Ähnlichkeiten aufweisen. Der Vorteil besteht darin, daß die Lokalisierung der Grenzen zwischen diesen Gebieten frei von subjektiven Faktoren mit einem einheitlichen quantitativen Kriterium vorgenommen wird.

9.2 Strömungskarte für den vertikalen Strömungskanal

Die Methode des unüberwachten Lernens wurde auf die Daten von der Durchschaltung der vertikalen Rohrleitungen mit den drei zur Verfügung stehenden Rohrdurchmessern 29, 51,2 und 81 mm angewandt. Die Aufnahme der Signale erfolgte mit dem kontinuierlichen Transmissionsverfahren KT, d.h. die Kurzbezeichnung der verwendeten Datensätze ist V3KT, V5KT und V8KT.

Für die Merkmalsextraktion wurde das lineare Vorhersagemodell VLN 11. Ordnung verwendet. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen war das bessere, fraktale Verfahren FRC noch nicht verfügbar. Um die Selektivität des linearen Vorhersagemodells zu steigern, wurde der Merkmalsvektor um eine zusätzliche Komponente, den Mittelwert der Signalamplitude, erweitert. Die Nutzung der Information, die im Mittelwert enthalten ist, macht die visuell erkennbare Empfindlichkeit dieser Größe (s. Bild 9.1) für das Clustering verfügbar.

In Bild 9.2 ist die Gesamtvarianz der optimalen Partition in Abhängigkeit von der Anzahl der Gruppen in der Partition dargestellt. Die Unterbrechung der kontinuierlichen Abnahme nach Aufteilung in 5 bzw. 6 Gruppen deutet auf die optimale formale Anzahl von Gruppen hin. Die Auswirkung der stufenweisen Erhöhung der Gruppenanzahl ist am Beispiel der Daten V5KT in Bild 9.3 in Gegenüberstellung mit den Volumenstromdichten dargestellt.

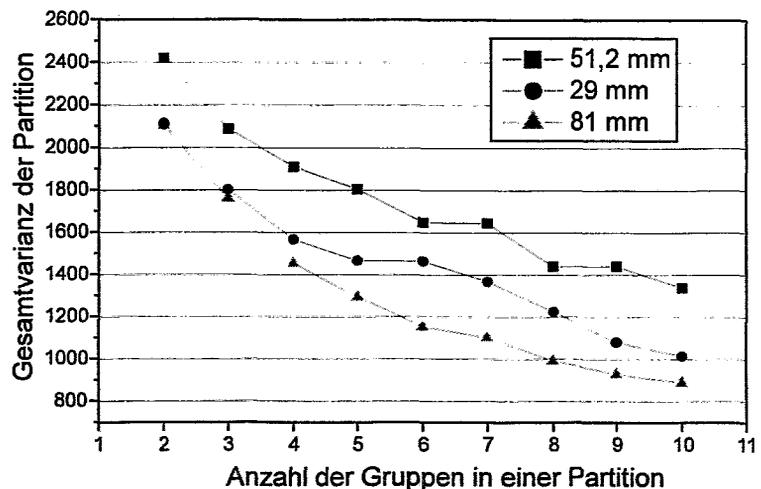


Bild 9.2 Gesamtvarianz der optimalen Partition für die verschiedenen Rohrdurchmesser

Die Clusterbildung liefert, bis auf wenige Ausnahmen, zusammenhängende Bereiche, was nicht trivial ist, da, wie oben ausgeführt, dem Verfahren die Volumenstromdichten nicht mitgeteilt wurden. Die Bildung zusammenhängender Bereiche ist deshalb ein Indiz dafür, daß Gebiete ähnlicher Strömungszustände identifiziert wurden. Die bei Annahme von 5 Gruppen erhaltenen Partitionen werden im folgenden mit Strömungskarten aus der Literatur verglichen (Dukler & Taitel 1977, Ishii & Mishima 1980, Annunziato et al. 1987).

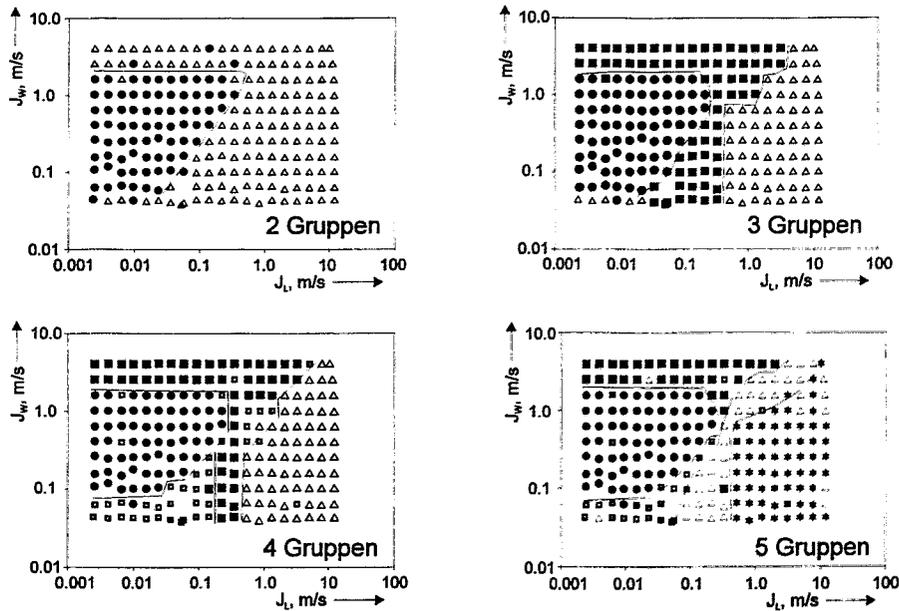


Bild 9.3 Optimale Partitionen in Abhängigkeit von der Anzahl der Gruppen am Beispiel der Rohrleitung mit dem Durchmesser 51,2 mm

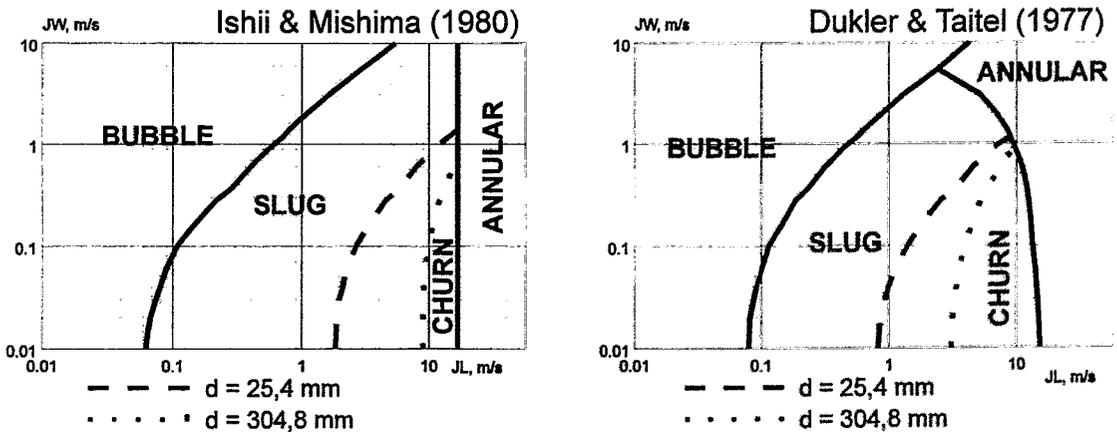


Bild 9.4 Vergleich verschiedener Strömungskarten aus der Literatur

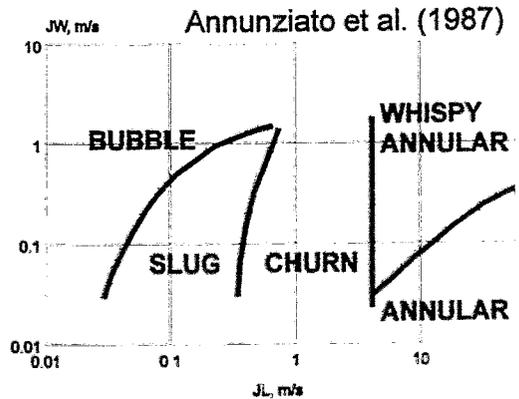


Bild 9.4 zeigt zunächst eine Gegenüberstellung der genannten Strömungskarten. Die Unterschiede zwischen den Karten von Dukler & Taitel und Ishii & Mishima sind relativ gering. Der Bereich der Ringströmung (Annular Flow) beginnt nach Dukler & Taitel

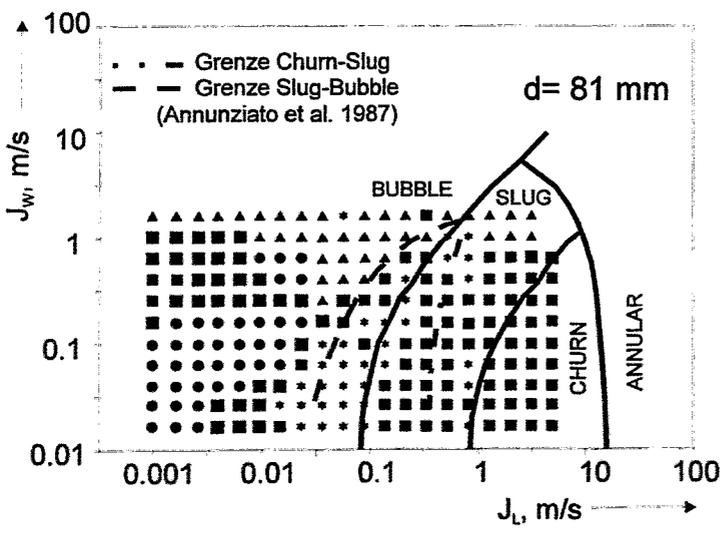
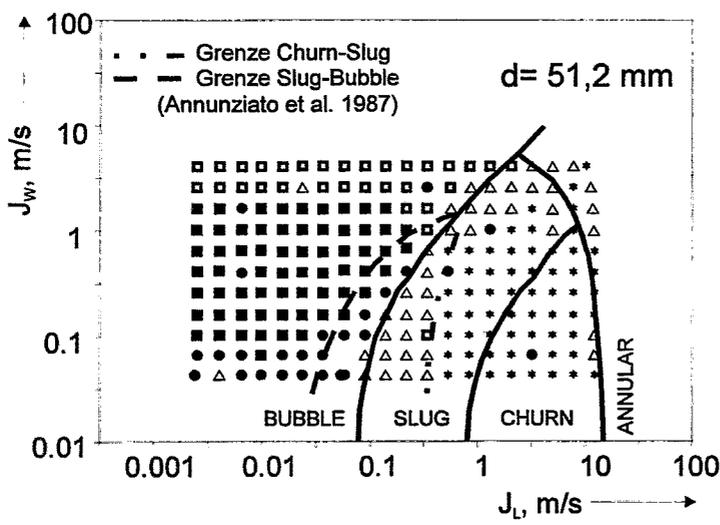
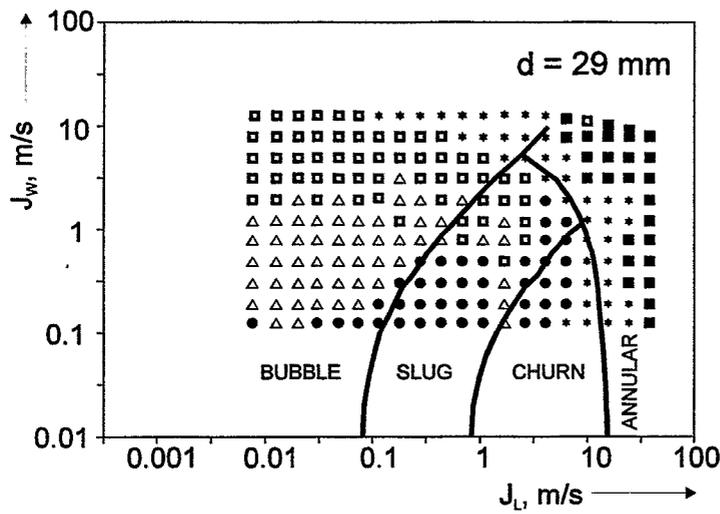


Bild 9.5 Optimale Partitionen in Gegenüberstellung mit der Strömungskarte nach Dukler & Taitel (1977)

bei hohen Wassergeschwindigkeiten schon bei kleineren Werten der Gasvolumenstromdichte. Beide Karten verzeichnen eine Abhängigkeit der Lage der Grenzkurve zwischen Schaumströmung (Churn Flow) und Pfropfenströmung (Slug Flow) vom Rohrlängendurchmesser: Eine Vergrößerung des Durchmessers verschiebt die Grenze zu höheren Gasvolumenstromdichten hin. Annunziato et al. (1987) haben allerdings mit Hilfe von lokalen Sonden beobachtet, daß in einer Rohrleitung von 90 mm Durchmesser die Grenzkurven Schaumströmung - Pfropfenströmung sowie Pfropfenströmung - Blasenströmung bei erheblich kleineren Luftvolumenstromdichten liegen, als dies bei der Kurve für 25,4 mm von den beiden anderen Karten der Fall ist. Auch der Übergang zur Ringströmung findet nach Annunziato et al. (1987) bereits bei einer Volumenstromdichte der Luft von ca. 3 m/s statt, wogegen die beiden anderen Karten diesen Übergang bei kleinen Wasserdurchsätzen erst bei über 10 m/s Luftvolumenstromdichte angeben. Annunziato et al. (1987) unterscheiden im Bereich der Ringströmung außerdem zwischen Annular und Whispy Annular Flow.

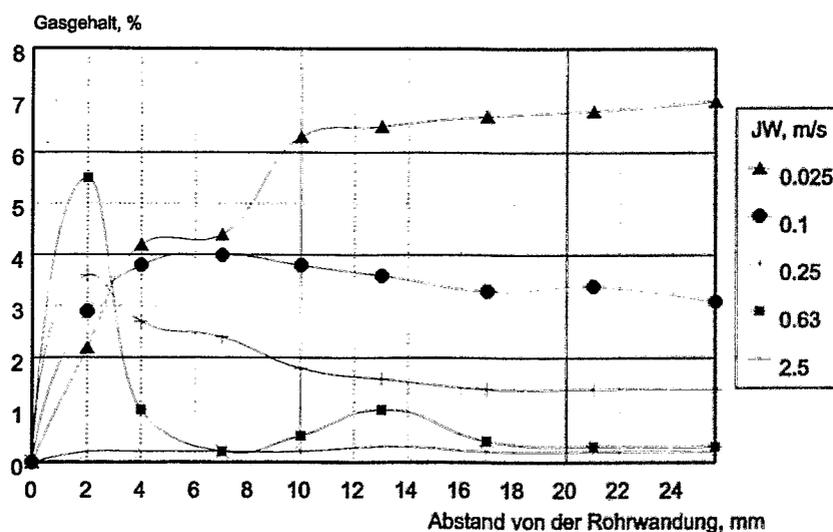
In Bild 9.5 werden die für die Durchmesser 29, 51.2 und 81 mm ermittelten Partitionen mit jeweils 5 Gruppen mit der Strömungskarte nach Dukler & Taitel (1977) gegenübergestellt. Die Zuordnung der Symbole für die einzelnen Gruppen ist dabei beliebig

und entsteht automatisch im Zuge des Optimierungsprozesses bei der Ermittlung der Partitionen. Deshalb existiert keine Übereinstimmung von Symbolen, die in den drei Einzeldarstellungen ähnlich gelagerte Bereiche kennzeichnen.

Betrachtet man zuerst das Ergebnis für $d = 29$ mm, so fällt eine Gruppe auf, die mit dem Gebiet der Ringströmung korreliert. Bei diesem Durchmesser war bei den Versuchen die Volumenstromdichte des Gases hoch genug, um in den Bereich der Ringströmung zu gelangen. Es zeigt sich, daß die Strömungskarte nach Dukler & Taitel (1977) die Verhältnisse besser widerspiegelt, als die Karte nach Ishii & Mishima (1980), da die Gruppe, die der Ringströmung zugeordnet werden kann, sich bei wachsender Wassergeschwindigkeit zu kleineren Gasvolumenströmen hin ausdehnt. Die Grenzkurve der Ringströmung nach Annunziato et al. (1987) kann hier nicht identifiziert werden.

Bei $d = 29$ mm ist es schwer, den Übergang von Churn zu Slug Flow zu erkennen. Bei den beiden größeren Durchmessern 51,2 und 81 mm scheint der Übergang im Vergleich zur Karte nach Dukler & Taitel schon bei kleineren Gasvolumenstromdichten stattzufinden. Die von Annunziato (1987) angegebene Grenzkurve korreliert hier etwas besser mit einer Grenze zwischen zwei charakteristischen Gruppen.

Bei allen drei Durchmessern erkennt man eine deutliche Abgrenzung des Bereichs der Blasenströmung. Dieser ist jedoch weiter strukturiert, wobei drei Gruppen identifiziert werden. Messungen des Gasgehaltsprofils an der Testschleife in Rossendorf mit einem Feld aus 8 Nadelsonden ergaben, daß bei bestimmten Kombinationen von Volumenstromdichten ein Profil mit einem Maximum in der Nähe der Innenwand der Rohrleitung auftritt (Bild 9.6).



Volumenstromdichte der Luft: $V_L = 0.013$ m/s

Bild 9.6 Ausgewählte radiale Profile des lokalen Gasgehalts in der vertikalen Testsektion von 51,2 mm Durchmesser

Das Randmaximum ist auf das Wirken der Magnus-Kraft zurückzuführen, die die Blasen an die Rohrwandung drängt. Bei hohen Flüssigkeitgeschwindigkeiten verschwindet dieses Profil durch das Wirken der turbulenten Vermischung, bei kleinen Flüssigkeitgeschwindigkeiten bzw. bei hohen Gasvolumenströmen wirkt der resul-

tierende hohe Gasanteil turbulenzierend und das Randmaximum verschwindet ebenfalls. Über diesen Effekt ist bereits detaillierter berichtet worden (Prasser, Ringel 1995).

In Bild 9.6 wurden Verteilungen für eine konstante Volumenstromdichte der Luft von 0,013 m/s bei Variation der Volumenstromdichte des Wassers gegenübergestellt. Der Effekt der Herausbildung des Randmaximums infolge zunehmender Magnus-Kraft bei Erhöhung der Wassergeschwindigkeit ist gut zu erkennen. Wenn die turbulente Vermischung infolge weiter ansteigender Wassergeschwindigkeit überhand gewinnt, findet eine erneute Vergleichmäßigung statt.

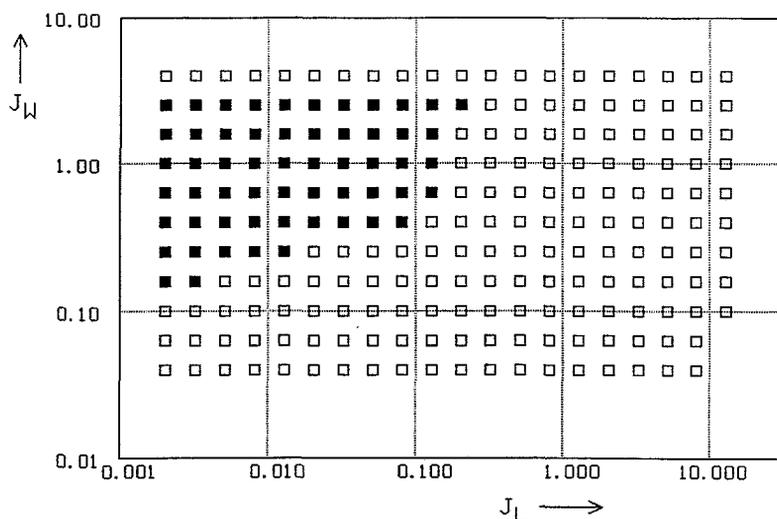


Bild 9.7 Strömungsbereich mit ausgeprägtem Randmaximum (ausgefüllte Punkte) der Gasgehaltsverteilung, gemessen mit Nadelsonden, $d_i = 51,2$ mm

Die Meßdaten der Nadelsonden wurden hinsichtlich dieses Effekts ausgewertet. Als Kriterium für das Vorhandensein des Randmaximums wurde der Gasgehalt der äußersten Sonde mit dem mittleren Gasanteil verglichen. Wenn der Wert am Rand größer als der Mittelwert ist, wurde ein Randmaximum diagnostiziert. Das Ergebnis ist für $d = 51,2$ mm in Bild 9.7 dargestellt. Der Bereich des Randmaximums deckt sich gut mit der Struktur der Gruppen innerhalb des Bereichs der Blasenströmung im Bild 9.7.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Methode des unüberwachten Lernens (Clustering) für die Aufstellung von Strömungskarten genutzt werden kann. Die vorgestellten Ergebnisse tragen jedoch vorläufigen Charakter. Hauptsächlich ist anzumerken, daß die zugrundegelegten Daten und das verwendete Merkmalsextraktionsverfahren nicht dem im Zuge des Vorhabens entwickelten Optimum entsprachen.

Es besteht begründete Aussicht auf eine Verbesserung der Qualität der Ergebnisse durch die Anwendung des fraktalen Merkmalsextraktionsverfahrens in Verbindung mit der Puls-Transmissions-Technik zur Aufnahme der primären Meßsignale. Außerdem müssen tiefgehende Überlegungen zur Auswahl der optimalen Anzahl von Gruppen angestellt werden.

9.3 Abhängigkeit der Erkennungsraten des Mustererkennungsverfahrens mit überwachtem Lernen von der Strömungsform

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde, daß die Ultraschallsignale die Übergänge zwischen verschiedenen Strömungsformen widerspiegeln, liegt es

nahe, die Abhängigkeit der Erkennungsrate von den Volumenstromdichten bei der Mustererkennung mit überwachtem Lernen auf den Wechsel von Strömungsformen zurückzuführen. Hierzu wurde in Bild 6.2 die Strömungskarte nach Dukler & Taitel (1977) mit dem Zusatz nach Annunziato (1987) eingetragen. Das Ergebnis zeigt Bild 9.8:

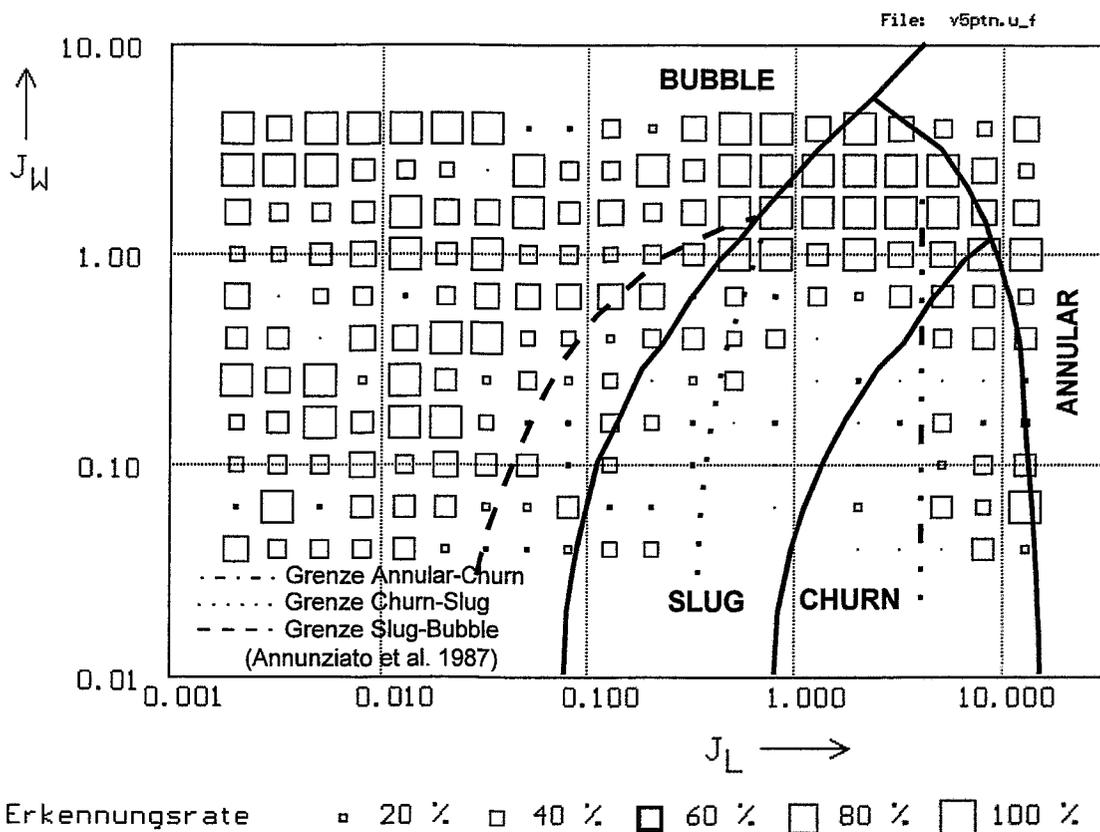
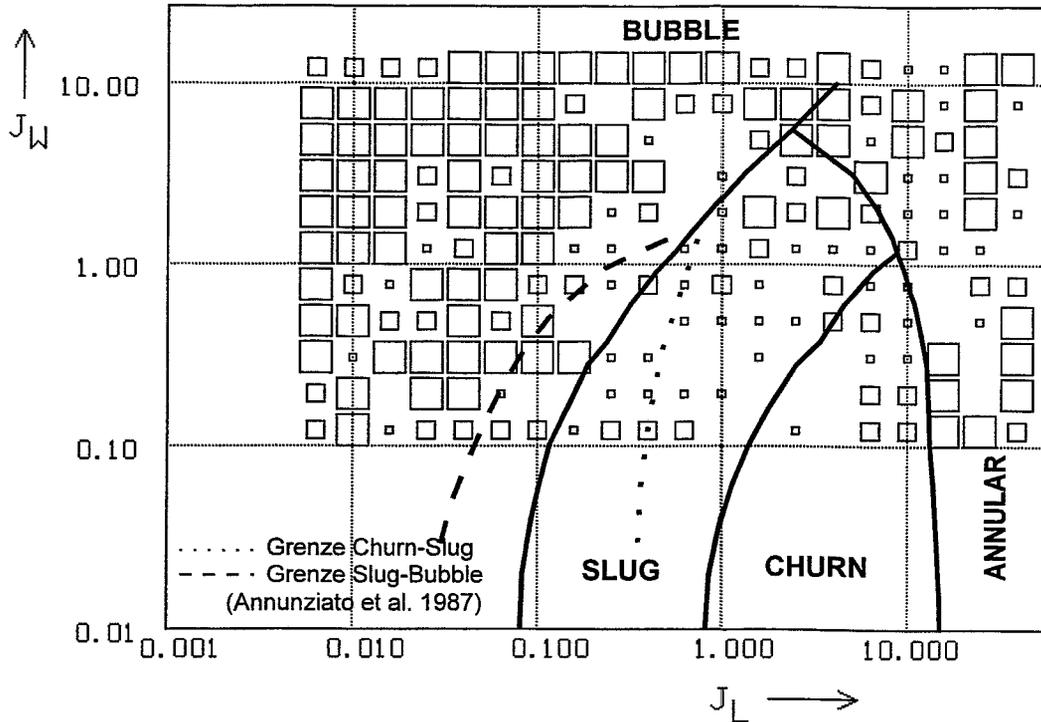


Bild 9.8 Gegenüberstellung des Klassifizierungsergebnisses für die vertikale Rohrleitung, Durchmesser 51,2 mm, Verfahren FRC / PTN (vgl. Bild 6.2), mit der Strömungskarte nach Dukler & Taitel (1977) sowie der Ergänzung von Annunziato et al. (1987)

Hohe Erkennungsraten sind vorrangig im Bereich der Blasenströmung zu beobachten. In den Gebieten der Pfropfen- bzw. Schaumströmung liegen gute Ergebnisse bei höheren Wassergeschwindigkeiten, d.h. bei kleineren Gasanteilen vor. Bemerkenswert ist die Zunahme der Erkennungsrate beim Übergang zur Ringströmung.

Diese Aussagen bestätigen sich auch für die Ergebnisse an der Rohrleitung mit 29 mm Durchmesser, wie Bild 9.9 zeigt.



Erkennungsrate ◻ 20 % ◻ 40 % ◻ 60 % ◻ 80 % ◻ 100 %

Bild 9.9 Gegenüberstellung des Klassifizierungsergebnisses für die vertikale Rohrleitung, Durchmesser 29 mm, Verfahren FRC / PT (vgl. Bild 7.2), mit der Strömungskarte nach Dukler & Taitel (1977) sowie der Ergänzung von Annunziato et al. (1987)

Zusammenfassend wird festgestellt, daß die Gegenüberstellung der Erkennungsra-
ten mit den Strömungskarten den Grund für die schlechte Klassifizierung in be-
stimmten Volumenstrombereichen erklärt. In diesen Bereichen liegt eine Pfropfen-
bzw. Schaumströmung vor, die einen stark instationären Charakter aufweisen, d.h.
trotz konstanten Volumenströmen am Einspeiseort sind die Volumenstromdichten
am Meßort zeitlich nicht konstant. Dies ist wahrscheinlich der Grund für die geringen
Erkennungsra-ten.

10 Experimente bei Dampfbetrieb der Zweiphasen-Testschleife

10.1 Testdaten

Es stehen von der vertikalen und der horizontalen Testsektion je zwei Datenserien für Auswertungen zur Verfügung. An der vertikalen Testsektion wurde mit dem Puls-Echo- und dem Puls-Transmissions-Verfahren gearbeitet, an der horizontalen kam das kontinuierliche Transmissionsverfahren mit den Hochtemperatursensoren LNA-4 zum Einsatz. Bei letzterem wurde die Rohrleitung sowohl vertikal als auch horizontal durchschallt:

Tabelle 10.1 Meßserien bei Dampfbetrieb der Zweiphasen-Testschleife

Abk.	Testsektion	Durchschallung	Hardware	Sensor
V5PE_D	vertikal		Puls-Transmission, 600 Hz	Wellen- leiter
V5PT_D	vertikal			
H5KTV_D	horizontal	vertikal	kontinuierliche Trans- mission, Wobbelung	LNA-4
H5KTH_D	horizontal	horizontal		

10.2 Klassifizierungsergebnisse

Bild 10.1 zeigt die Erkennungsraten, die innerhalb der Testdaten aus Tabelle 10.1 erzielt wurden. Entgegen den Erkenntnissen beim Luftbetrieb wurde beim Dampfbetrieb beobachtet, daß das lineare Vorhersagemodell bessere Ergebnisse liefert. Die Erkennungsraten liegen zwischen 75 und 82 %. Allerdings ist zu beachten, daß die thermodynamischen Parameter der einzelnen Testpunkte wesentlich weiter auseinander liegen, als dies bei den Luft-Wasser-Messungen der Fall war. Zudem liegen bei allen Meßpunkten unterschiedliche thermodynamische Randbedingungen vor, da sich der Druck im System entsprechend der Wärmebilanz der Testschleife von Fall zu Fall auf unterschiedliche Werte einpegelte.

Im weiteren wurde versucht, eine Übertragbarkeit zur Luft-Wasser-Strömung herzustellen. Zu diesem Zweck wurde das Mustererkennungsverfahren mit Daten aus den entsprechenden Luft-Wasser-Experimenten trainiert. Anschließend wurden die Dampf-Wasser-Signale klassifiziert. Als Kriterium für die korrekte Zuordnung der Testpunkte wurde der mit den Nadelsonden gemessene volumetrische Gas- bzw. Dampfanteil verwendet: Ein Testpunkt wurde als korrekt klassifiziert betrachtet, wenn der am nächsten liegende Wert des Gasanteils identifiziert wurde. Die Untersuchungen ergaben, daß die Übertragbarkeit nicht gegeben ist. Dies ist nicht weiter verwunderlich, wenn schon bei Variation der Temperatur oder des Drucks innerhalb der Luft-Wasser-Signale keine Übertragbarkeit vorliegt (vgl. Punkte 7.2, 8.3 und 8.4).

Für eine praktische Nutzung des Mustererkennungsverfahrens muß folglich, wie schon in Abschnitt 7.2 vorgeschlagen, die Erweiterung der Strömungsparameter für das überwachte Lernen durch thermodynamische Randbedingungen erfolgen. Bei einer Dampf-Wasser-Strömung im Sättigungszustand genügt hierbei die Einbeziehung entweder des Drucks oder der Temperatur, so daß drei unabhängig zu variierende Parameter vorliegen (z.B. J_W , J_D , p_S).

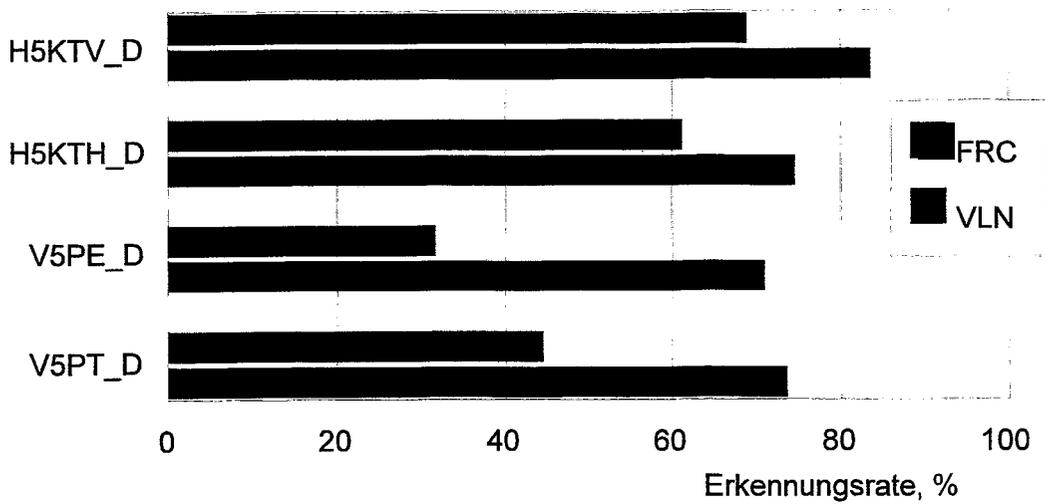


Bild 10.1 Ergebnisse der Klassifizierung der Testdaten aus den Versuchen mit Dampfbetrieb, Verfahren FRC und VLN ohne Filterung, Meßzeit: 5 s (bei PE und PT), 10 s (bei KT), 2 Trainingsstichproben

Insgesamt erlauben die bisher durchgeführten Dampf-Wasser-Experimente keine abschließenden Aussagen, da in der Testschleife zur Zeit noch keine freie Variation der Volumenstromdichte des Dampfes und des Drucks realisiert werden kann. Die Ergebnisse tragen deshalb vorläufigen Charakter.

11 Eignung der Ultraschallverfahren als Störfallinstrumentierung

11.1 Aufgabenstellung / Stand der Technik

Im Rahmen des Vorhabens wurde untersucht, ob die betrachteten Ultraschallverfahren als Störfallinstrumentierung an Druckwasserreaktoren eingesetzt werden können. Hierbei geht es um eine Mitte-Loop-Füllstandsdetektion für den heißen Strang der Hauptumwälzleitung. Das Auftreten größerer Mengen Dampf oder eines Gemischspiegels im heißen Strang der Hauptumwälzleitung soll als indirekte Information über einen Füllstandsabfall im Reaktordruckbehälter herangezogen werden. Ziel ist es, ein Absinken des Kühlmittelinventars im Reaktordruckbehälter zu erkennen und somit rechtzeitig ein Signal für die Einleitung von Gegenmaßnahmen gegen eine Kernfreilegung bei Kühlmittelverlust-Störfällen bereitzustellen. Es wurde untersucht, ob hierfür die Ausstattung der Hauptumwälzleitung mit Ultraschallsensoren in Verbindung mit einer geeigneten Signalauswertung geeignet ist.

Ein Schwerpunkt liegt auf der Nutzung der Vorteile der im Projekt entwickelten Methoden, d.h. der direkten Ankopplung von temperaturfesten Ultraschallwandlern, die derzeit nur als breitbandige Schallemissionsaufnehmer verfügbar sind. Die Untersuchungen wurden experimentell an einem Segment einer originalen Hauptkühlmittelleitung angestellt. Das Rohrleitungsstück wurde von der Firma Siemens AG, Bereich Energieerzeugung KWU, Erlangen, leihweise zur Verfügung gestellt. Die Rohrleitung besteht aus ferritischem Stahl. Ihr Außendurchmesser beträgt 876 mm, der Innendurchmesser beträgt 750 mm bei einer Wandstärke von 63 mm. Auf der Innenseite ist eine 5 mm starke austenitische Plattierung aufgebracht.

Im einzelnen wurde untersucht,

- ob eine zuverlässige Einschallung in das Meßmedium auch im Fall der plattierten Hauptumwälzleitungen möglich ist,
- ob mit Hilfe von klassischen Impuls-Echo-Verfahren eine Messung des Flüssigkeitsspiegels in der Rohrleitung realisiert werden kann,
- ob artfremd eingesetzte Hochtemperatur-Schallemissionsaufnehmer im Impuls-Echo-Betrieb genutzt werden können und
- inwieweit Mustererkennungsverfahren, die auf typische Fluktuationen von Durchschallungssignalen trainiert werden, einen Nachweis oder eine Messung des Flüssigkeitsstandes gestatten.

In der Literatur werden im wesentlichen Methoden beschrieben, die auf der Anwendung der Laufzeitmessung beim Impuls-Echo-Verfahren basieren. Von Morala & Chang (1986) wird ein derartiger Meßaufbau beschrieben. In einer stratifizierten Strömung kann damit die Schichthöhe und deren Schwankung bei ruhiger und bei wellenförmiger Flüssigkeitsoberfläche gemessen werden. Beim Auftreten eines Pfropfens oder eines Schwallts gelingt dessen Vermessung.

Problematisch ist aber die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit (und somit der Laufzeit des Schalls) von der Temperatur. Morala & Chang (1986) führen nur Meßergebnisse für ein Wasser-Luft-Regime bei Umgebungstemperaturen an. Zum Einsatz kamen Ultraschallprüfköpfe mit Sendefrequenzen zwischen 2 und 5 MHz, die nicht temperaturbeständig sind.

Eine speziell auf die Anwendung an Kernreaktoren ausgerichtete Methode wird von Jossinet (1989) vorgestellt. Zur Messung des Flüssigkeitsspiegels in der Hauptkühlmittelleitung werden zwei Ultraschallprüfköpfe an diese angeklemt, die einerseits vertikal von unten und andererseits horizontal in das Rohr einschallen. In horizontaler Richtung wird durch die Registrierung des Rückwandechos die Schallgeschwindigkeit gemessen, was in Anbetracht der veränderlichen Temperatur des Kühlmittels erforderlich ist, um in vertikaler Richtung aus der Laufzeit des Schalls die Höhe des Flüssigkeitsspiegels bestimmen zu können. Für den Fall, daß der Spiegel unter die Marke des horizontalen Ultraschallstrahls absinkt und deshalb die Schallgeschwindigkeit nicht mehr gemessen werden kann, wird auf eine Temperaturmessung zurückgegriffen und die Schallgeschwindigkeit berechnet. Gearbeitet wurde mit einer Frequenz von 2,25 MHz.

Problematisch wurde von Jossinet (1989) der Langzeiteinsatz von piezoelektrischen Wandlern gesehen, die an heißen Bauteilen ($>300^{\circ}\text{C}$) angekoppelt sind.

Zusammenfassend wird festgestellt, daß in der recherchierten Literatur keine Lösung für eine dauerhafte Betriebs- bzw. Störfallinstrumentierung der Hauptkühlmittelleitung beschrieben wird. Die speziellen Voraussetzungen, an die alle in der Literatur vorgestellten Verfahren gebunden sind, führen zu einer starken Einschränkung ihrer praktischen Anwendbarkeit.

11.2 Höhenstandsmessung mit Hilfe des Impuls-Echo-Verfahrens

11.2.1 Methodik der Experimente

Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen wurden an einem Segment einer originalen Hauptkühlmittelleitung (siehe Kapitel 11.1) durchgeführt. Die Messungen fanden im kalten Zustand (20°C) bei Atmosphärendruck statt. Hierzu wurden die Stirnflächen des in horizontaler Lage befindlichen Rohrleitungssegments mit Plexiglasplatten verschlossen. In das so entstandene Volumen wurde Wasser eingefüllt und der Füllstand variiert. Der Ultraschallsensor wurde unten an die Rohrleitung angekoppelt.

Die Bestimmung des Füllstands erfolgte durch die Auswertung der Laufzeit des Ultraschalls im Kühlmittel. Die Laufzeit wurde mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit bei 20°C in einen Füllstand umgerechnet.

11.2.2 Einsatz eines Ultraschallprüfkopfes vom Typ K2K

Zunächst wurde versucht, das in der Literatur beschriebene Impuls-Echo-Verfahren zur Messung des Flüssigkeitshöhenstandes mit einem hierfür geeigneten Ultraschallsensor nachzuvollziehen. Hierzu wurde ein Prüfkopf vom Typ K2K mit einer Resonanzfrequenz von 2 MHz von unten an die Rohrleitungswandung angebracht (Bild 11.1).

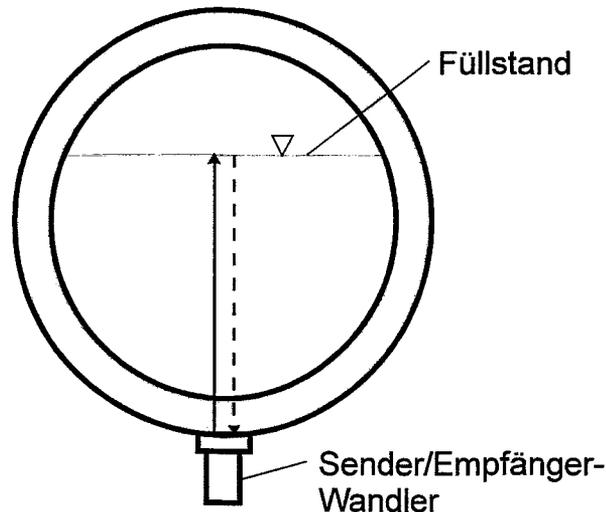


Bild 11.1 Prinzip der Höhenstandsmessung mit Hilfe des Impuls-Echo-Verfahrens

Die Ultraschallschwinger vom Typ K2K sind handelsübliche Prüfköpfe der Firma Krautkrämer GmbH & Co, Hürth. Die Hauptanwendungen dieser Prüfköpfe liegen im Nachweis von Fehlern (z.B. von Poren) in der Materialprüfung. Sie haben deshalb einen sehr schmalen Frequenzbereich bei etwa 2 MHz. Die maximale Einsatztemperatur dieser Prüfköpfe beträgt aufgrund der fehlenden Wärmeverträglichkeit des sensitiven Elements bzw. des Klebers ca. 60°C. Prinzipiell eignet sich dieser Sensortyp zur Registrierung der Laufzeit des Ultraschalls für Höhenstandsmessungen von kaltem Wasser. Bei den hier beschriebenen Versuchen wurde ein Prüfkopf an ein handelsübliches Impuls-Echo-Gerät (USIP 12) desselben Herstellers angeschlossen. Das Echosignal wurde vom Prüfkopf empfangen und über dieses Gerät an einen PC zur Signalaufzeichnung weitergeleitet.

Deutlich sind aus den Signalverläufen in Bild 11.2 der Sendeimpuls und das Echo von der Wasseroberfläche erkenntlich. Beim Höhenstand von 300 mm ist außerdem das (deutlich kleinere) 2. Echo von der Wasseroberfläche erkennbar. Dieses Signal hat das Wasser zweimal in jede Richtung durchlaufen. Direkt nach dem Sendeimpuls ist noch ein kleiner Peak erkennbar. Dieser stellt das Echo von der Rohrinneenseite (Phasengrenze Stahl-Wasser) dar. Als Zeitpunkt $t=0$ wurde in den Bildern 11.2 und 11.4 der Beginn des Sendeimpulses gewählt.

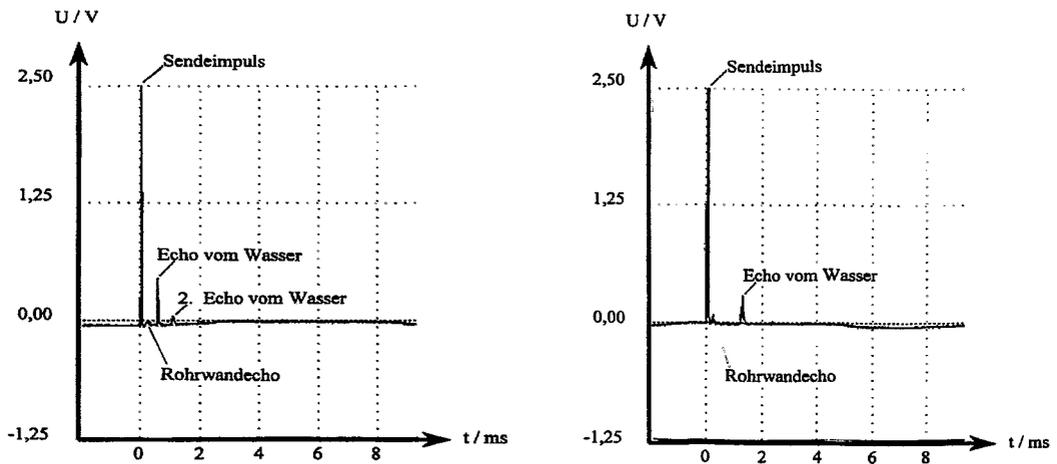


Bild 11.2 Typische Signalverläufe bei den Höhenstandsmessungen mittels Sensortyp K2K; links bei einem Höhenstand von 300 mm, rechts bei einem Höhenstand von 700 mm

In Bild 11.3 ist die Gesamtlaufzeit in Abhängigkeit des Wasserhöhenstandes dargestellt. Die Gesamtlaufzeit beim Wasserhöhenstand null entspricht der Laufzeit des Ultraschallstrahles durch die Rohrwandung.

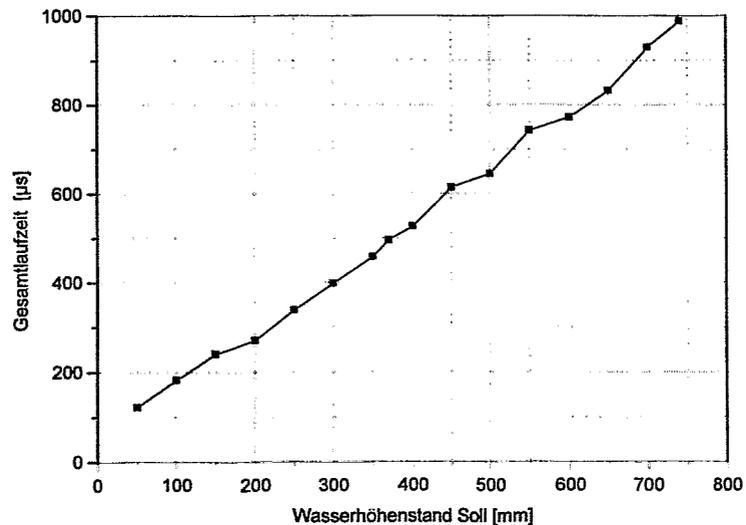


Bild 11.3 Darstellung der Gesamtlaufzeit des emittierten Ultraschallimpulses beim Impuls-Echo-Verfahren unter Verwendung des Ultraschallprüfkopfes K2K

Ergebnisse:

- Mit einem Ultraschallprüfkopf vom Typ K2K (Fa. Krautkrämer, Frequenz 2 MHz) wird ein deutliches Echo von der Wasseroberfläche empfangen. Bei Einschaltung von unten ist somit die Messung des Wasserhöhenstandes in der Hauptkühlmittelleitung mit dem Impuls-Echo-Verfahren möglich. Bei kleinen Füllständen ist es schwierig, das 1. Echo der Flüssigkeitsoberfläche eindeutig zu identifizieren, da andere Echos eine höhere Amplitude aufweisen können (z.B. das 2. Echo der Flüssigkeitsoberfläche). Dieser Umstand muß bei einer automatischen Datenauswertung beachtet werden.
- Diese und ähnliche Prüfköpfe sind für die Anwendung des Impuls-Echo-Verfahrens gut geeignet. Die Betriebstemperatur industriell verfügbarer Prüfköpfe ist jedoch auf 60 °C (entsprechend den Herstellerangaben) begrenzt. Erforderlich ist eine Langzeitstabilität bei Temperaturen um 300 °C. Das Verfahren scheidet daher für die praktische Anwendung aus.

11.2.3 Einsatz eines Hochtemperatur-Schallemissionsaufnehmers vom Typ LNA-4

Schallemissionsaufnehmer sind Ultraschalldetektoren, die wegen ihrer breitbandigen Auslegung und der vergleichsweise niedrigen Resonanzfrequenz (< 1 MHz) gewöhnlich nicht für den Impuls-Echo-Betrieb eingesetzt werden können.

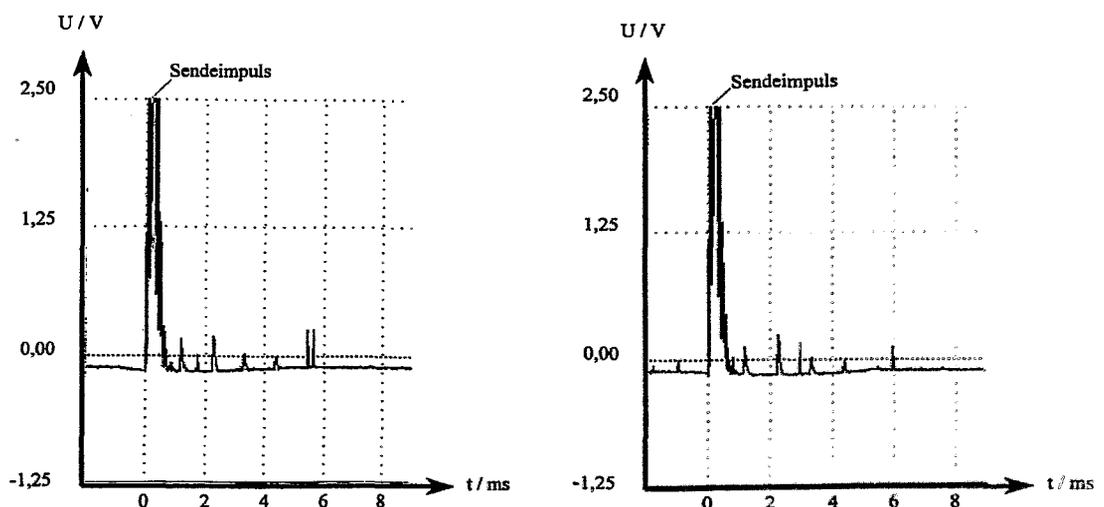


Bild 11.4 Typische Signalverläufe bei den Höhenstandsmessungen mittels Sensortyp LNA-4; links bei einem Höhenstand von 300 mm, rechts bei einem Höhenstand von 700 mm

Bei Verwendung von Lithium-Niobat als Material für den Piezokristall können sie jedoch im Gegensatz zu Ultraschallprüfköpfen bei Temperaturen bis zu 550 °C

betrieben werden, was eine direkte Ankopplung an eine heiße Hauptkühlmittelleitung ohne weiteres erlauben würde. Aus diesem Grund ist versucht worden, die Aufnehmer trotz der schlechten Eignung im Impuls-Echo-Betrieb für die Höhenstandsmessung zu verwenden. Dabei ergab sich, daß die Aufnehmer trotz der Breitbandigkeit noch genügend Energie in die Rohrwandung einschallen, um Echosignale sicher zu empfangen. Die Meßanordnung entspricht dem im Bild 11.1 dargestellten Prinzip.

Ergebnisse:

- In den Signalverläufen (Bild 11.4) sind Mehrfachechos erkennbar, die wahrscheinlich durch den Umlauf des Schalls entlang der Rohrwandung (und ganzzahliger Vielfacher) entstehen. Das eigentliche Echo von der Wasseroberfläche ist nur manchmal als kleiner Peak erkennbar. Bei geringen Höhenständen wird das Echo vom Sendeimpuls überdeckt, der aufgrund der Breitbandigkeit der Aufnehmer besonders lang ist. Die verwendeten Sensoren sind nicht für eine Füllstandsmessung nach dem Echoprinzip geeignet.

11.3 Höhenstandsmessungen mittels Durchschallung und anschließender Mustererkennung

11.3.1 Methodik der Experimente

Die Messungen wurden wiederum an dem Segment der Hauptumwälzleitung von Siemens/KWU durchgeführt. Für die Durchschallung wurden ausschließlich Hochtemperatur-Schallemissionsaufnehmer vom Typ LNA-4 verwendet.

Die Anwendung von Mustererkennungsverfahren zur Klassifizierung von Durchschallungssignalen erlaubt die Zuordnung von Zuständen mit identischen Strömungsparametern anhand der Identifikation charakteristischer Signalfluktuationen. Angewandt auf die Füllstandsmessung ist die bei einem bestimmten Füllstand vorliegende Strömungssituation zu klassifizieren. Es wird von der Hypothese ausgegangen, daß die Fluktuationen des Durchschallungssignals charakteristische Informationen über den Füllstand enthalten. Die Bestimmung des Füllstands kann dann durch Zuordnung des aufgenommenen Signals zu Mustern erfolgen, die bei definiertem Füllstand angelernt worden sind.

Im Testsegment fehlen die für die Strömung in der Hauptumwälzleitung typischen Schwankungen des Füllstands. Das eingefüllte Wasser liegt vielmehr zunächst als ruhende Schicht vor. Um die Güte der Klassifikation durch das Mustererkennungsverfahren prinzipiell zu testen, mußten Schwankungen künstlich hervorgehoben werden. Bei den entsprechenden Versuchen wurde dazu in den unteren Bereich ein kleiner Luftstrom eingespeist, der in Form von Gasblasen im Wasser aufsteigt und die freie Flüssigkeitsoberfläche zu Schwankungen anregt. Für den praktischen Einsatz des Verfahrens muß das Training des Mustererkennungsverfahrens mit Signalen aus der originalen Anlage erfolgen.

Es wurde sowohl die horizontale als auch die vertikale Durchschallung der Rohrleitung erprobt. Hierzu wurden zwei Sensoren auf gegenüberliegenden Seiten der Rohrleitung angebracht (s. Bild 11.5). Einer der Sensoren wurde kontinuierlich als

Sender betrieben, der andere Sensor empfing das durch den schwankenden Füllstand beeinflusste (modulierte) Durchschallungssignal.

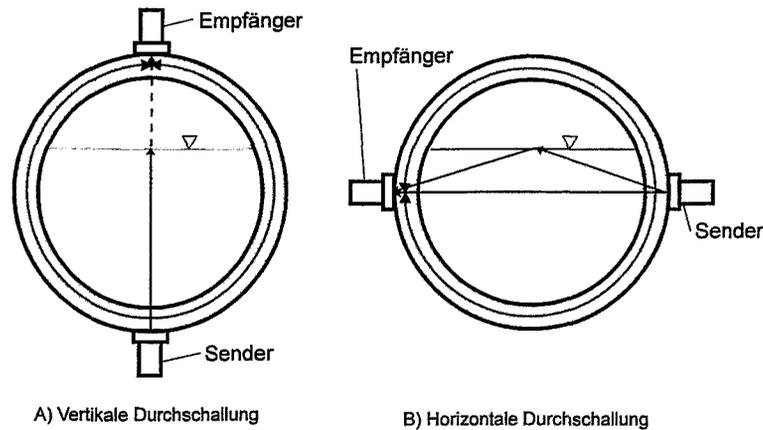


Bild 11.5 Prinzip der Durchschallung in vertikaler und horizontaler Richtung

11.3.2 Durchschallung mit Schallemissionsaufnehmern vom Typ LNA-4

Die Veränderungen des Signals bei Variation des Höhenstands sind bereits am veränderlichen Gleichspannungsanteil zu erkennen. Die Ergebnisse einer Auswertung mit Hilfe von Verfahren der Mustererkennung sind für den Fall der vertikalen Durchschallung im Bild 11.6 dargestellt. Hierbei wurde eine Stichprobe des Signals für das Training des Verfahrens verwendet. Anschließend wurden weitere unabhängige Stichproben einer Klassifikation unterzogen.

Ergebnisse:

- Obwohl eine Durchschallung des gasförmigen Mediums aufgrund der Reflexion an der Flüssigkeitsoberfläche praktisch ausgeschlossen ist, tritt auch dann ein Empfangssignal auf, wenn die direkte Verbindungslinie zwischen Sender- und Empfängerwandler von der Gasphase unterbrochen ist. Dieser Fall tritt bei vertikaler Durchschallung bereits bei einer geringfügigen Absenkung des Füllstands ein, bei horizontaler Durchschallung jedoch erst bei weniger als halb gefüllter Leitung. Die empfangene Ultraschallintensität ist dabei hauptsächlich auf die Schalleitung in der Rohrwand zurückzuführen.
- Die empfangene Ultraschallintensität ist vom Füllstand abhängig. Bei vertikaler Durchschallung nimmt sie annähernd kontinuierlich ab (Bild 11.6), was sich wie folgt erklären läßt: Mit abnehmendem Höhenstand wird ein wachsender Anteil der Rohrwand freigelegt. Die Schalleitung findet offenbar vorrangig in der Rohrwandung statt. Wenn diese sich im Kontakt mit Flüssigkeit befindet, wird diese Welle stärker gedämpft als beim Kontakt mit der Gasphase. Bei der horizontalen Durchschallung hingegen konnte keine eindeutige Abhängigkeit des Signalmittelwertes vom Höhenstand gefunden werden.

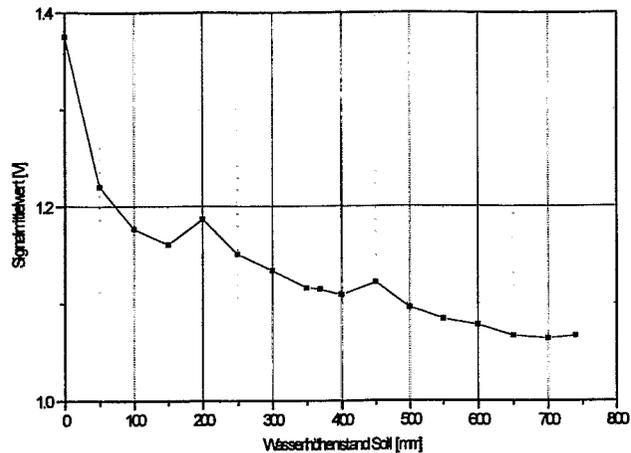


Bild 11.6 Darstellung des Signalmittelwertes in Abhängigkeit vom Höhenstand bei vertikaler Durchschallung, Sensortyp LNA-4

- Schwankungen des Flüssigkeitsspiegels führen zu einer charakteristischen Modulation der Ultraschallintensität. Die Signalfluktuationen sind in charakteristischer Weise vom Füllstand abhängig, so daß die getesteten Mustererkennungsverfahren (Merkmalsextraktion mit linearem Vorhersagemodell VLN, Merkmalsvektor erweitert um Mittelwert) in der Lage sind, die trainierte Höhenstände wiederzuerkennen (Bild 11.7). Die Erkennungsrate beträgt bei vertikaler Durchschallung ca. 90 %. Bei horizontaler Durchschallung sinkt die Erkennungsrate auf ca. 80 % ab.

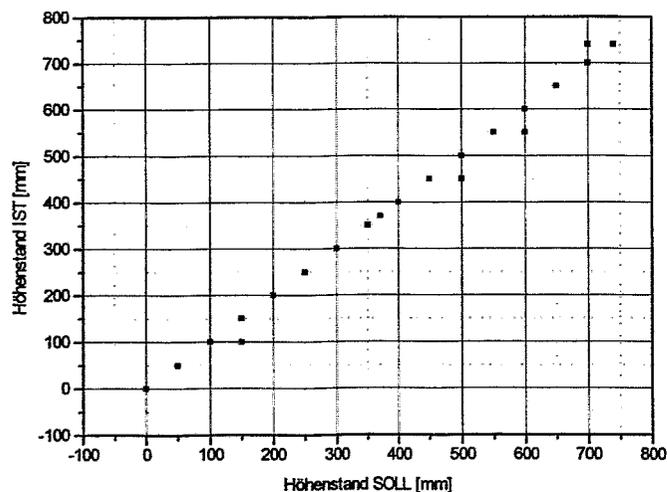


Bild 11.7 Klassifizierung des Wasserhöhenstandes bei vertikaler Durchschallung, Lufteinperlung, Sensortyp LNA-4

11.4 Zusammenfassung der Untersuchungen zur Höhenstandsmessung

Eine Füllstandsmessung mit Hilfe des Impuls-Echo-Verfahrens ist mit den vorhandenen Ultraschallaufnehmern nicht machbar. Nur bei Weiterentwicklung dieser Sensoren (Verringerung der Breitbandigkeit, Erhöhung der Resonanzfrequenz auf wenigstens 2 MHz) wäre ein Ansatz für Höhenstandsmessungen mittels dieser Sensoren im Impuls-Echo-Betrieb gegeben.

Die Analyse der Ultraschallsignale auf der Grundlage des Impuls-Echo-Verfahrens bzw. des Durchschallungsverfahrens zeigt, daß eine On-Line-Identifikation des Wasserhöhenstandes im Rohr möglich. Dieser Sachverhalt gilt für ein druckloses Rohr bei Umgebungstemperaturen. Untersuchungen über den Druck- und Temperatureinfluß sowie den Einfluß von Umgebungsstörungen (Ausfall der Stromversorgung der Meßeinrichtung, Vibrationen der Anlage) wurden im Rahmen dieses Vorhabens nicht durchgeführt. Die hier erzielten Erkennungsraten lagen im Bereich von 83 % bei vertikaler Durchschallung ohne Lufteinperlung bis 97 % bei horizontaler Durchschallung und konstanter Lufteinperlung.

In der recherchierten Literatur werden für das Impuls-Echo-Verfahren keine geeigneten Ultraschallprüfköpfe erwähnt, die temperaturbeständig sind. Temperaturbeständige Ultraschallgeber eignen sich hingegen aufgrund einer anderen Herstellungstechnologie und der damit verbundenen Breitbandigkeit nur unzureichend für den Impuls-Echo-Betrieb.

Für die Höhenstandsmessung mit Hilfe des Impuls-Echo-Betriebes sind deshalb noch umfangreiche Entwicklungsarbeiten zur Sensorfertigung erforderlich.

Beim Einsatz der Hochtemperatur-Schallemissionsaufnehmer im kontinuierlichen Durchschallungsbetrieb (sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung) konnte gezeigt werden, daß beim Auftreten eines schwankenden Flüssigkeitsspiegels in der Hauptkühlmittelleitung charakteristische Signaleigenschaften registriert werden können. Die anschließenden Mustererkennungsverfahren sind in der Lage, mit hoher Erkennungsrate die unterschiedlichen Signalverläufe den zugehörigen Höhenständen zuzuordnen. Deshalb ist diese Methode als Detektor für eine Änderung des Flüssigkeitshöhenstandes in der Hauptumwälzleitung ein vielversprechender Ansatz.

Der Entwicklungsstand des derzeitigen Klassifikationssystems ist im Rahmen der technischen Überwachung von Anlagen und Prozessen in die Kategorie der Störungsüberwachung einzuordnen. Ausgehend von einem Soll-Wasserhöhenstand, dem sogenannten unkritischen Zustand, kann der Ist-Wasserhöhenstand laufend im Rohr erfaßt werden. Treten Abweichungen (Störungen) von diesem vorgegebenen Soll-Zustand auf, so werden sie identifiziert und gemeldet. Anschließend kann nach einer vorgegebenen Strategie reagiert werden. Eine Erweiterung auf ein System zur Fehlerfrühd Diagnose und Fehlerdiagnose ist bei Vorliegen entsprechender Informationen prinzipiell möglich.

12 Zusammenfassung

Die wichtigsten Ergebnisse, die im Rahmen des diesem Berichts zugrundeliegenden Forschungsvorhaben erzielt wurden, sind in den folgenden kurzen Thesen zusammengefaßt:

- 1 - An einer von einem Flüssigkeits-Gas-Gemisch durchflossenen Rohrleitung aufgezeichnete Ultraschall-Transmissionssignale und -Echosignale werden durch die instationäre Verteilung der Phasen in charakteristischer Weise moduliert. Mit Hilfe der Mustererkennung kann eine Klassifizierung dieser Ultraschallsignale hinsichtlich der Ähnlichkeit zweier Strömungssituationen erfolgen. Nach einer umfangreichen Kalibrierung (Training) kann das Mustererkennungsverfahren zur Messung von Strömungsparametern dienen.
- 2 - Die entwickelte breitbandige Anregung des Ultraschallsenders (kontinuierliche Transmission mit Wobbelung des Sendesignals) führt zu einer Verringerung des Störanteils im empfangenen Signal, der durch Verschiebung von akustischen Resonanzen infolge von Temperatur- und Dichteschwankungen hervorgerufen wird. Das Signal-Rausch-Verhältnis wird wesentlich verbessert.
- 3 - Die Durchschallung im Impulsbetrieb bei Begrenzung des Empfangssignals auf das Zeitfenster (Puls-Transmissionsbetrieb mit Zeitfensterung), innerhalb dessen der Direktschall am Empfängerwandler eintrifft, führt hinsichtlich der Verminderung von Störeinflüssen zu dem gleichen Ergebnis. Eine weitere Form der Signalgewinnung besteht in der Nutzung des Puls-Echo-Verfahrens mit Zeitfensterung.
- 4 - Die kontinuierliche Durchschallung im modulierten Dauerstrich-Betrieb kann mit breitbandigen Hochtemperatur-Schallemissionsaufnehmern erfolgen. Die mit Lithium-Niobat-Kristallen ausgestatteten Aufnehmer erlauben eine direkte Ankopplung an auch heiße Rohrleitungen. Schmalbandige Ultraschallprüfköpfe sind im Grundsatz für die Durchschallung besser geeignet. Kommerziell angebotene Prüfköpfe weisen jedoch derzeit keine vergleichbare Temperaturbeständigkeit aus.
- 5 - Die Durchschallung im Impulsbetrieb mit Zeitfensterung ist mit Wellenleitersensoren möglich, da bei der Einstellung des Zeitfensters die Laufzeit in den Wellenleitern berücksichtigt werden kann und dabei unerwünschte Mehrfachreflexionen in den Wellenleitern ausgeblendet werden. Die Wellenleiter schützen die Piezokristalle vor unzulässiger Erwärmung. Dadurch können angepaßte, schmalbandige Ultraschallprüfköpfe verwendet werden.
- 6 - Mit Hilfe von Mustererkennungsverfahren ist die Klassifizierung von Durchschallungs- bzw. Echosignalen möglich, die für verschiedene Strömungszustände aufgenommen wurden. Wenn das Mustererkennungsverfahren mit Trainingssignalen angelernt wird, deren einzelne Realisierung unter unabhängiger Variation der Volumenstromdichten von Flüssigkeit und Gasphase erhalten wurden, so ist in den Grenzen des Trainingsumfangs eine Zuordnung der Werte der Volumenstromdichten zu Signalmustern möglich, die bei unbekanntem Situationen aufgenommen wurden. Damit eignet sich das Verfahren zur gleichzeitigen, unabhängigen Messung der Volumenstromdichten

der beiden strömenden Phasen, wenn ein Training des Verfahrens unter identischen Randbedingungen praktisch durchführbar ist.

- 7 - Das günstigste Verfahren zur Merkmalsextraktion aus Ultraschalltransmissionssignalen ist das fraktale Verfahren (FRC) der Berechnung der Küstenlinie des Verlaufs des primären Meßsignals. Die Koeffizienten des Merkmalsvektors werden aus der Länge der Küstenlinie für unterschiedliche Zeitschritte der Diskretisierung gebildet. Getestet wurden außerdem polare Verfahren, die den Abstand zwischen Extremwerten im primären Meßsignal auswerten, und ein lineares Vorhersagemodell.
- 8 - Mit dem fraktalen Verfahren werden innerhalb einzelner Gebiete der untersuchten Volumenstrommatrix Meßfehler in der Größenordnung von 10 % erreicht. Dies trifft insbesondere für das Gebiete der Blasenströmung zu.
- 9 - Geringe Erkennungsraten, und damit eine eingeschränkte Anwendbarkeit des Meßverfahrens, liegen bei einer Pfropfen- bzw. Schaumströmung vor. Der Grund liegt im stark instationären Charakter dieser Strömungsformen, d.h. trotz konstanten Volumenströmen am Einspeiseort sind die Volumenstromdichten am Meßort zeitlich nicht konstant.
- 10 - Der Impulsbetrieb bei Zeitfensterung mit den mit Wellenleitern ausgestatteten schmalbandigen Ultraschallprüfköpfen ergibt deutlich bessere Erkennungsraten, als der frequenzmodulierte Dauerstrich-Betrieb mit breitbandigen Schallemissionswandlern. Die Nachteile des Wellenleiters werden durch die Zeitfensterung aufgehoben und die Vorteile angepaßter Wandler mit hohem Wirkungsgrad können ausgenutzt werden.
- 11 - Die Erkennungsraten für Trainingsmatrizen, die bei höheren Temperaturen, bei einem veränderten Rohrleitungsdurchmesser oder bei Wasser-Dampf-Gemisch mit unterschiedlichem Sättigungsdruck aufgenommen wurden, zeigen, daß das Mustererkennungsverfahren auch innerhalb dieser Trainingsgebiete anwendbar ist.
- 12 - Merkmalsvektoren, die bei bestimmten Randbedingungen (Medium, Rohrleitungsgeometrie, Temperatur, Druck) ermittelt werden, sind auf andere Randbedingungen nicht übertragbar. Änderungen der Stoffwerte des Strömungsmediums gegenüber der Trainingsphase führen zum Versagen der Klassifizierung.
- 13 - Das Klassifizierungsverfahren kann durch Erweiterung der Trainingsmatrizen um einen die thermodynamischen Eigenschaften determinierenden Parameter (z.B. Temperatur, Sättigungsdruck o.ä.) auf Fälle mit veränderlichen Stoffwerten angewandt werden. Der Umfang der Trainingsphase steigt dabei jedoch stark an. Die Erkennungsraten bezüglich der Volumenstromdichten gehen nur unwesentlich zurück.
- 14 - Mit dem Verfahren des unüberwachten Lernens können Klassen von ähnlichen Strömungszuständen identifiziert werden, die mit gängigen Strömungskarten aus der Literatur strukturell gut in Übereinstimmung stehen. Damit ist das Durchschallungsverfahren in Verbindung mit den entwickelten Mustererkennungsalgorithmen zur automatischen Aufstellung bzw. Verifizierung von

Strömungskarten geeignet. Der Vorteil besteht in der Anwendung eines von a-priori-Information freien, einheitlichen quantitativen Verfahrens zur Ermittlung der Grenzen zwischen den Strömungsformen, das ohne subjektive Bewertungen auskommt.

- 15 - Eine Mitte-Loop-Instrumentierung für den heißen Strang auf Basis einer horizontalen oder vertikalen Durchschallung mit Ultraschall ist grundsätzlich machbar. Wenn typische Fluktuationen des Wasserstandes vorliegen, sind die entwickelten Mustererkennungsverfahren in der Lage, Transmissions-signale hinsichtlich des Füllstands zu klassifizieren. Es ist jedoch fraglich, ob ein solches Verfahren für eine Einbindung in Sicherheitssysteme qualifiziert werden kann, da die Füllstandsfluktuationen von zu vielen Einflußgrößen abhängen, die im Einzelfall schlecht reproduzierbar sein dürften.
- 16 - Eine Durchschallbarkeit der Hauptumwälzleitung ist mit den getesteten Hochtemperaturaufnehmern technisch möglich. Eine Mitte-Loop-Instrumentierung sollte nicht auf dem Nachweis von Fluktuationsanteilen im Füllstand basieren, sondern den Füllstand über die Laufzeit oder die Dämpfung des Ultraschallsignals messen. Hierfür ist eine Weiterentwicklung der Hochtemperaturaufnehmer in Richtung auf schmalbandige Prüfköpfe für Echomessungen oder die Optimierung von Wellenleitersensoren notwendig. Es bleibt die Frage offen, ob Ultraschallaufnehmer auf Piezobasis bei den hohen Strahlungswerten an der Hauptumwälzleitung (N-16-Strahlung) über längere Zeit funktionsfähig bleiben.

Im Ergebnis der Arbeiten bleiben eine Reihe Fragen offen bzw. bestehen noch weitere Entwicklungspotenzen. Die Anwendung des Mustererkennungsverfahrens zur Volumenstrommessung mit der Methode des überwachten Lernens ist ausgehend von den negativen Ergebnissen bezüglich der Übertragbarkeit auf solche Aufgabenstellungen beschränkt, bei denen der Trainingsaufwand in Grenzen bleibt, d.h. gut abgegrenzte und nicht zu umfangreiche Wertebereiche überstrichen werden müssen. Auch muß die Beschaffung der notwendigen Trainingsstichproben technisch realisierbar und wirtschaftlich vertretbar sein. Damit scheidet das Verfahren für wissenschaftliche Anwendungen aus, da hier meist große Parameterbereiche von Interesse sind.

Demgegenüber ist eine Anwendung als Strömungswächter oder Meßglied in Regelkreisen für industrielle Anwendungen durchaus denkbar. Hier geht es meist um stark eingeschränkte Meßbereiche, etwa um die Umgebung eines Arbeitspunktes, so daß der Trainingsaufwand verhältnismäßig klein ist. Bei industriellen Anlagen ist zudem meist eine größere Anzahl gleichartiger Meßstellen gefordert. In diesem Fall kann eine dieser Meßstellen mit zusätzlicher, auf anderen Methoden basierender Meßtechnik ausgestattet werden, die die für das überwachte Lernen notwendigen Strömungsparameter liefert. Die entsprechende Ultraschallanlage kann die Merkmalsvektoren für alle anderen Meßstellen gewinnen und z.B. über ein Rechnernetz an diese weiterleiten. Das Training kann in einem solchen System in der Inbetriebnahmephase erfolgen und während des eigentlichen Betriebs im Sinne einer ständigen adaptiven Verbesserung der Meßgenauigkeit fortgesetzt werden.

Was die Erkennungsraten und damit die Meßgenauigkeit betrifft, so sind aus heutiger Sicht die Potenzen des Mustererkennungsverfahrens noch nicht ausgeschöpft. Das im Rahmen des Projekts kontinuierlich bezüglich Hard- und Software

verbesserte Verfahren führte zu einem für praktische Anwendungen bereitstehenden Gerät, welches selbst jedoch bisher nur bei wenigen Testserien zum Einsatz kam. Eine Erweiterung der Testerfahrung ist somit wünschenswert. Die Weiterentwicklung des fraktalen Verfahrens zur Merkmalsextraktion ist vielversprechend. Besonders im Bereich der stark instationären Strömungsformen Schaum- und Pfropfenströmung kann die Erkennungsrate möglicherweise durch Verfahren gesteigert werden, die Merkmalsvektoren aus kürzeren Stichprobensequenzen bilden können und diesen momentane Volumenstromwerte zuordnen.

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Erkennungsraten und damit der Meßgenauigkeit besteht in der Konstruktion von Merkmalsvektoren aus Komponenten, die von verschiedenen Signalverarbeitungsmethoden bzw. aus unterschiedlichen Signalquellen stammen. Ein Beispiel ist die Kombination von vertikaler und horizontaler Durchschallung einer horizontalen Rohrleitung. Die Erprobung derartiger Möglichkeiten kann mit Hilfe der im Rahmen des Projekts aufgezeichneten Testdaten erfolgen.

Das Verfahren des unüberwachten Lernens ist zur Aufstellung bzw. Verifikation von Strömungskarten geeignet. Die bisher erzielten Ergebnisse betreffen nur die vertikale Zweiphasenströmung und tragen vorläufigen Charakter. Die Methode kann durch die Verwendung des fraktalen Merkmalsextraktionsverfahrens und der verbesserten Ultraschallhardware weiterentwickelt werden. Eine Weiterführung wäre denkbar, indem zunächst die im Projekt erhaltenen, umfangreichen Testdaten umfassend unter Anwendung des fraktalen Merkmalsextraktionsverfahrens ausgewertet werden. Im nächsten Schritt ist ein Übergang zu anderen Parametern (Druck, Temperatur, Rohrleitungsdurchmesser) von Interesse.

13 Anhang

13.1 Literatur

- (Aha et al. 1991) Aha, D.W.; Kibler, D.; Albert, M.K.: *Instance-Based Learning Algorithms, Machine Learning*. Volume 6, 1991, p. 37-66.
- (Albrecht et al. 1984) Albrecht, R.W.; Crowe, R.D.; Dailey, D.J.; Hollenbach, D.F.: *Neutronic Fluctuation Analysis as a Characterizing Vehicle for Two-Phase-Flow. Measuring Techniques in Gas-Liquid Two-Phase Flow*, Hrs. Delhaye, J.M.; Cognat, G.; Springer Verlag Berlin 1984, p. 337-358.
- (Annunziato et al. 1987) Annunziato, M.; Giammartini, S.; Presaghi, M.; Sica, M.: *Void Fraction Measurement with Optical Probe Systems*. Presented at the European Two-Phase Flow Group Meeting, Trondheim, Norway, July 1987.
- (Aritomi 1997) Aritomi, M.: *Measuring of Two-Phase Flow Characteristics using Ultrasonic Velocity Profile Monitor*. OECD/CSNI Specialist Meeting on Advanced Instrumentation and Measurement Techniques, Santa Barbara, Ca., March 17-20, 1997.
- (Barschdorff et al. 1991) Barschdorff, D.; Jiong, C.; Wöstenkühler W.: *Ein lernendes Mustererkennungsverfahren zur akustischen Qualitätsprüfung von Lüftermotoren*. Automatisierungstechnik 39 S. 243-48, R. Oldenbourg Verlag, München, 1991.
- (Bensler et al. 1987) Bensler, H.P.; Delhaye, J.M.; Favreau, C.: *Measurement of interfacial area in bubbly flows by means of an ultrasonic technique*, ANS proceedings - 1987 national heat transfer conference, p. 240-246.
- (Bergles et al. 1981) Bergles, A.E.; Collier, J.G.; Delhaye, J.M.; Hewitt, G.F.; Mayinger, F.: *Two-Phase Flow and Heat Transfer in the Power and Process Industries*. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 1981.
- (Carrica 1995) Carrica, P.M.; Sanz, D.; Delgadino, G.; Zanette, D.; Marco, P.: *A Contribution to Uncertainties Estimation of Local Void Fraction Measurements in Gas-Liquid Flows*. Eds. Celata; G.P., Shah, R.K.: *Two-Phase Flow Modelling and Experimentation*, p. 709-714, 1995.
- (Chang et al. 1983) Chang, J.S. et al.: *Void Fraction Measurement by an Ultrasonic Transmission Technique in Bubbly*

- Gas-Liquid Two-Phase Flow*. Symp. Meas. Techniques in Gas-Liquid Two-Phase Flows, Nancy, France, 5-8 July 1983, p. 319-335.
- (Chang, Morala 1990) Chang, J.S.; Morala, E.C.: *Determination of two-phase interfacial areas by an ultrasonic technique*. Nuclear Engineering and Design 122(1990) S.143-156.
- (Cybenko, Allen 1987) Cybenko, G.; Allen, T.G.: *Parallel algorithms for classification and clustering*. SPIE Advance Algorithms and Architectures for Signal Processing II 827 p. 126-132, 1987.
- (Delhaye 1981) Delhaye, J.M.: *Two-Phase Flow Pattern*. Eds. Delhaye, J.M.; Giot, M.; Riethmuller, M.L.; Thermohydraulics of Two-Phase System for Industrial Design and Nuclear Engineering, Hemisphere Publishing Corporation, p. 1-39, 1981.
- (Duignan, May 1993) Duignan, M.R.; May, C.P.; Walker, N.M.: *Final data report: Vertical process-pipe flow characteristics experiment*. Westinghouse Savannah River Co., Aiken, SC Funding Organisation: USDOE, Washington, DC, 1993.
- (Dukler, Taitel 1977) Taitel, Y.; Dukler, A. E.: *Flow regime transitions for vertical upwards gas liquid flow: A preliminary approach through physical modelling*. Progress Report No. 1, University of Houston, NUREG-0162, 1977.
- (Franca et al. 1991) Franca, F.; Acikgoz, M.; Lahey, A.; Clause, A.: *The use of fractal techniques for flow identification*. Int. Journal of Multiphase Flow, Vol.17, No. 4, p. 545-552, 1991.
- (Frankum et al. 1995) Frankum, D.P.; Wadekar, V.V.; Azzopardi, B.J.: *Two-Phase Flow Patterns for Evaporating Flow*. Eds. Celata; G.P., Shah, R.K.: Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, p. 1315-1322, 1995.
- (Fröhlich et al. 1989) Fröhlich, K.J. et al.: *Akustische Überwachung des Sicherheitsventils am Druckhalter in Kernkraftwerken des Typs WWER—440*. 8. Fischlandkolloquium, 28.-29.9.1989, Wustrow, Tagungsbericht der Hochschule für Seefahrt Warnemünde-Wustrow, S. 115-124.
- (Govier, Azis 1972) Govier, G.W.; Azis, K.: *The Flow of Complex Mixtures in Pipes*. Van Nostrand, NY, 1972.

- (Griffith, Wallis 1961) Griffith, P.; Wallis G.B.: *Two-Phase slug Flow*. Trans. ASME, J. Heat Transfer 83, p. 307-320, 1961.
- (Gühmann et al. 1994) Gühmann, C.; Röpke, K.; Filbert, D.: *Klassifikation von Zeitreihen mittels fehlersensitiver Filter*. Tech. Mess. v. 61(1) (1994), S. 16 - 22.
- (Hamming 1987) Hamming, R.W.: *Digitale Filter*. Weinheim Verlag (VCH), New York, 1987.
- (Hewitt, Roberts 1969) Hewitt, G.F.; Roberts, D.N.: *Studies of two-phase flow patterns by simultaneous X-ray and flash photography*. AERE-M2159, 1969.
- (Hilgert, Hofmann 1986) Hilgert, W.; Hofmann, H.: *Charakterisierung der Gasphasenströmung in Blasensäulen bei kleinen Gasleerrohrgeschwindigkeiten mit Hilfe der Ultraschall-Doppler-Technik*. Chem.-Ing.- Techn. 58(1986)3, S. 228-229.
- (Hofmann et al. 1990) Hofmann, B. et al.: *Beiträge zur Sicherheitsmeßtechnik energetischer und umweltschutztechnischer Anlagen durch Nutzung von Verfahren der Ultraschall-Sensorik*. Studie, Arbeitsbericht des ZfK Rossendorf, RPF 1/90, Dezember 1990.
- (Hofmann et al. 1991) Hofmann, B. et al.: *Determination of bubble column parameters in a gas-liquid two-phase flow*. Poster-vortrag auf 1st European Fluid Mechanics Conference, Cambridge, September 16-20, 1991.
- (Hofmann, Rockstroh 1993) Hofmann, B.; Rockstroh, M.: *Beitrag zur Bestimmung der Parameter und zur Detektion der Struktur von Zweiphasenströmungen mittels Ultraschall*. Forschungsbericht (Sachbericht) zum Verwendungsnachweis 1992, WIP-Fördervertrag Nr. 020075/I, KAI e.V., Februar 1993.
- (Huhn, Wolf 1975) Huhn, J.; Wolf, J.: *Zweiphasenströmung*. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1975.
- (Ishii, Mishima 1980) Ishii, M.; Mishima, K.: *Study of two-fluid model and interfacial area*. Argonne National Laboratory, ANL-80-111, NUREG/CR-1873, 1980.
- (Jones et al. 1986) Jones, S.W.; Amblard, A.; Favreau, C.: *Interaction of an ultrasonic wave with a bubbly mixture*. Exp. Fluids. (16 Sep 1986) v. 4(6) p. 341-349.
- (Jones, Zuber 1975) Jones, O.C.; Zuber, N.: *The Interrelation between Void Fractions Fluctuations and Flow Pattern in Two-*

- Phase Flow. Multiphase-Flow, Vol. 2, p. 273-306, 1975.*
- (Jossinet 1989) Jossinet, G.: *Ultrasonic measurements applied to monitoring of pressurized water pipes in nuclear power plants.* Ultrasonic International 1989, Madrid, 3.-7. July 1989, Proc. p. 115-120.
- (Kailath 1985) Kailath, T.: *Linear Estimation for Stationary and Near-Stationary Processes.* In Modern Signal Processing, Hrs. Kailath, T. Hemisphere Pub. Corp. p. 59-128, 1985.
- (Kalkhof et al. 1989) Kalkhof, D. et al.: *Detection of defects in austenitic pipings and welds of nuclear power plant components by ultrasonics.* Int. J. Pres. Ves. and Piping 39 (1989), p. 279-291.
- (Keller 1991) Keller, H.: *Eindimensionale, skalierungsinvariante Mustererkennungsverfahren zur Detektion von Boherschäden.* Automatisierungstechnik 39 S. 243-255, R. Oldenbourg Verlag, München, 1991.
- (Kossok et al. 1996) Kossok, N.; Prasser, H.-M.; Schütz, P.: *Messung der Volumenströme von Gas und Flüssigkeit in einer Zweiphasenströmung mit Ultraschall und Mustererkennung.* In *Meßtechnik zur Untersuchung von Vorgängen in thermischen Energieanlagen.* Hrs. Kaiser, E.; Nöther, K., Kraftwerktechnisches Kolloquium, Dresden, S. 121-130, 1996.
- (Kühnicke 1985) Kühnicke, E.: *Theoretische Untersuchungen zur Entstehung und Ausbreitung von Schallemissionsimpulsen in Platten unter einachsiger Belastung.* Dissertation A, Magdeburg 1985.
- (Kühnicke 1990a) Kühnicke, E.: *Modell für Sende-Empfangsprüfköpfe.* Seminar der DGZfP, Modelle und Theorien für die Ultraschallprüfung. Berlin, 1990, Berichtsband der DGZfP Nr. 23, S. 89-96.
- (Kühnicke 1990b) Kühnicke, H.: *Akustische Feldberechnungen in nichtschubspannungsfreien, berandeten Medien mit Hilfe der verallgemeinerten Strahlentheorie und der Teilchenverfolgungsmethode.* Seminar der DGZfP, Modelle und Theorien für die Ultraschallprüfung, Berlin, 1990, Berichtsband der DGZfP Nr. 23, S. 138-148.
- (Lattimer et al. 1979) Lattimer, J.; Fitting, D. W.; Adler, L.: *Ultrasonic dynamic imaging (UDI) system to determine the size and velocity of large spherical simulated bubbles in*

liquids. ASNT fall conference, St. Louis, USA, 1979, CONF-791008-5.

- (Lightstone, Chang 1991) Lightstone, L.; Chang, J.S.: *Three-dimension stratified laminar gas-liquid two-phase pipe flow models*. Proceedings of the second international symposium on multiphase flow and heat transfer. Volume 1 and 2. Hemisphere Publishing. 1991. p. 67-77 of 1490 p.
- (Lipsett et al. 1986) Lipsett, J.J.; Noble, R.D.; Liu, D.D.S.: *Time series analysis of gamma- densitometer signals*. Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. Sec. A (Holland), A242, 3, p. 582-587, 1986.
- (Makhoul 1975) Makhoul, J.: *Linear Prediction: A Tutorial Review*. Proceedings of the IEEE, Vol. 63, No. 4, Apr. 1975.
- (Matikainen et al. 1986) Matikainen, L.; Irons, G.A.; Morala, E.C.; Chang, J.S.: *Ultrasonic system for the detection of transient liquid/gas interfaces using the pulse-echo technique*. Rev. Sci. Instrumentation 57(1986) 8, p. 1661-1666.
- (Matsui 1988) Matsui, G.: *Flow pattern identification for gas-liquid flow in a pipe using differential pressure fluctuations*. Proc. 1st World Conf. On Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 4-9 September, Dubrovnik, Yugoslavia, p. 340-347, 1988.
- (Melnikov et al. 1987) Melnikov, V.I. et al.: *Development and study of an acoustic method of steam content measurement at the fuel assembly outlet of a reactor of an atomic heat generation station*. Sov. At. Energy (English translation), 61(1987)1, p. 528-532.
- (Melnikov, Nigmatulin 1994) Melnikov, V.I.; Nigmatulin, B.I.: *The newest two-phase flow control devices in LWR equipment based on ultrasonic and WAT-technology*. Nuclear Engineering and Design 149 (1994), p. 349-355.
- (Moore, Turtley 1983) Moore, A.E.; Turtley, D.N.: *Two-phase flow information from simple rapid response time instrumentation*. In. Conf. Physical Modelling of Multi-Phase Flow. Coventry, England, p. 353-376, 1983.
- (Morala et al. 1983) Morala, E.C.; Cheong, D.; Wan, P.T.; Chang, J.S.: *Ultrasonic wave propagations in a bubbly gas-liquid two-phase flow*. 3rd Multi-phase flow and heat transfer symposium-workshop, Miami Beach, FL (USA), 18-20 April, 1983.
- (Morala, Chang 1986) Morala, E.C.; Chang, J.S.: *Ultrasonic Pulse-Echo Technique for Measuring Instantaneous Liquid Level*

and time averaged void fraction in horizontal gas-liquid two-phase flow. Proceedings of the 4th Miami symposium on multi-phase transport particulate phenomena, Miami Beach, FL (USA), 15-17 December 1986.

- (Morgan et al. 1995) Morgan, N.; Bourlard-Herve, A.: *Neural Networks for Statistical Recognition of Continuous Speech.* Proceedings of the IEEE 83, S. 5742-5770, 1995.
- (Morriss, Hill 1990) Morriss, S.L.; Hill, A.D.: *Ultrasonic imaging and velocimetry in two-phase pipe flow.* Sichtbarmachung und Geschwindigkeitsmessung von Mehrphasenströmungen in Rohrleitungen. Univ. of Texas, Austin, USA. Konferenz-Einzelbericht: ASME-Papers, Paper-No. 90-Pet-2, S. 1-10, 1990.
- (Morriss, Hill 1993) Morriss, S.L.; Hill, A.D.: *Ultrasonic Imaging and Velocimetry in Two-Phase Pipe Flow.* Transactions of the ASME, Vol. 115, p.108-116, 1993.
- (Nakamura, Kondo 1997) Nakamura, H.; Kondo, M.: *Simultaneous Measurement of Liquid Velocity and Interface Profiles of Horizontal Duct Wavy Flow by Ultrasonic Velocity Profile Meter.* OECD/CSNI Specialist Meeting on Advanced Instrumentation and Measurement Techniques, Santa Barbara, Ca., March 17-20, 1997.
- (Niemann 1974) Niemann, H.: *Methoden der Mustererkennung.* Akademische Verlagsgesellschaft Frankfurt am Main, 1974.
- (Niemann 1983) Niemann, H.: *Klassifikation von Mustern.* Springer Verlag Berlin, 1983.
- (Ohlmer et al. 1984) Ohlmer, E. et al.: *Two-phase flow identification by calibration with stochastic parameters.* Measuring Techniques In Gas-Liquid Two-Phase Flows. Hrs. Delhay, J.M.; Cognet, G., Springer Verlag Berlin, p. 723-744, 1984.
- (Olma 1991) Olma, B.J.: *Acoustic Monitoring of U-tube Steam Generators.* Proceedings of SMORN VI Symposium, Gatlinburg, USA 19.-24.5.1991 2 74.01-74.13, 1991.
- (Olma 1992) Olma, B.J.: *Potential of acoustic signature analysis for component condition monitoring.* in NPPs 5th EPRI Predictive Maintenance Conference, September 21-23, Knoxville, Tennessee, USA, 1992.

- (Oshinowo, Charles 1974) Oshinowo, T.; Charles, M.E.: *Vertical two-phase flow*. Part 1. Flow pattern correlations. The Canad. J. Chem. Enging. 52 (1974), S. 25-35.
- (Peters et al. 1986) Peters, R.; Blichke, F.; Meyr, H.: *Parameterschätzverfahren zur Bestimmung der Durchflußgeschwindigkeit auf der Basis des Korrelationsprinzips*. Tech. Mess. v. 53(1) (1986) S. 1724.
- (Prasser 1991) Prasser, H.-M.: *Bestimmung der Strömungsform bei heißseitiger Notkühleinspeisung mittels elektrischer Leitfähigkeitssonden (E33)*. HDR Sicherheitsprogramm, 15. Statusbericht, Arbeitsbericht des Kernforschungszentrums Karlsruhe Nr. 05.52/91, S. 569-587.
- (Prasser et al. 1991) Prasser, H.-M. et al.: *Beobachtung des Loop-Seal-Clearings in der Integralanlage PMK-NVH des KFKI Budapest mit Nadelsonden*. Kernenergie 34(1991), H. 1, S. 21-24.
- (Prasser et al. 1993a) Prasser, H.-M.; Hensel, F.; Schütz, P.: *Untersuchung der Realisierbarkeit von Mustererkennungsverfahren zur Detektion der Struktur und zur Messung von Parametern einer Zweiphasenströmung mit Hilfe von Ultraschall*. Jahresbericht 1992 an das BMFT, Forschungszentrum Rossendorf, Januar 1993.
- (Prasser et al. 1993b) Prasser, H.-M.; Hensel, F.; Schütz, P.: *Verfahren zur Minimierung des Einflusses von Resonanzfluktuationen auf das Meßsignal bei Ultraschall-Durchschallungsuntersuchungen*. Patentanmeldung, Aktenzeichen P 4333645.0, Oktober 1993.
- (Prasser et al. 1994a) Prasser, H.-M.; Schütz, P.; Hensel, F.: *Untersuchungen der Realisierbarkeit von Mustererkennungsverfahren zur Detektion der Struktur und der Messung von Parametern einer Zweiphasenströmung mit Hilfe von Ultraschall*. BMBF, Abschlußbericht 1500 937, 1994.
- (Prasser et al. 1994b) Prasser, H.-M.; Schütz, P.; Hensel, F.: *Ultrasonic two-phase flow measurements based on pattern recognition techniques*. XIII IMEKO World Congress, Turin, September 5-9, 1994, Proc. p. 1112-1117.
- (Prasser, Ringel 1995) Prasser, H.-M.; Ringel, H.: *Gasgehaltsprofile in einer Blasenströmung bei erzwungener Konvektion*. GVC-Fachausschuß „Mehrphasenströmungen“, Magdeburg, 16.-17. Februar 1995.

- (Quinlan 1986) Quinlan, J.R.: *Induction of Decision Trees, Machine Learning*. Volume 1, No. 1, 1986, p. 81-106.
- (Rödel 1993) Rödel, E.: *Signalverarbeitung mit Cepstrum*. Teil 1, *Technisches Messen* 60 S. 135-140, R. Oldenbourg Verlag, München, 1993.
- (Rogers, Miller 1982) Rogers, S.C.; Miller, G.N.: *Ultrasonic level, temperature and density sensor*. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-29, No. 1, February 1982, p. 665-668.
- (Rouhani, Sohal 1983) Rouhani, S.Z.; Sohal, M.S.: *Two-Phase Flow Patterns. A Review of Research Results*. Progress in Nuclear Energy, 11, No.3, p. 219-259, 1983.
- (Ruske 1994) Ruske, G.: *Automatische Spracherkennung*. R. Oldenbourg Verlag, München, 1994.
- (Savitzky, Golay 1964) Savitzky, A.; Golay, M.J.E.: *Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Square Procedures*. Analytical Chemistry 36, p. 1627-1639, 1964.
- (Sawai, Yamuachi 1995) Sawai, T.; Yamuachi, S.: *An Investigation on time-series data processing of gas-liquid Two-Phase Flow*. Eds. Celata, G.P.; Shah, R.K.: *Two-Phase Flow Modelling and Experimentation*, p. 715-722, 1995.
- (Schmidt 1962) Schmidt, D.: *Experimentelle Untersuchungen über die Streuung von Schall in turbulenter Strömung*. Mitteilungen aus dem MPI für Strömungsforschung und der Aerodynamischen Versuchsanstalt, Göttingen 1962.
- (Schrüfer 1994) Schrüfer, E.: *Interpolation bei der diskreten Fourier-Transformation durch Einfügen von Nullen*. *Technisches Messen* 61 S. 289-293, R. Oldenbourg Verlag, München, 1994.
- (Schügerl et al. 1985) Schügerl, K. et al.: *Meßtechnik zur Charakterisierung von Gas /Flüssigkeits-Reaktoren*. Chem.-Ing.-Techn. 57(1985), H. 8, S. 641-650.
- (Sekoguchi et al. 1987) Sekoguchi, K.; Inoue, K.; Imasaka, T.: *Void signal analysis and gas-liquid to-phase flow regime determination by a statistical pattern recognition method*. Bull. JSME, 30, No.266, p. 1266-1273, 1987.
- (Sengpiel, Meyder 1990) Sengpiel, W.; Meyder, R.: *The development of bubbly two-phase flow in vertical channels with reference to local gas fraction and turbulence structure*.

- Experimental results at KfK, Fifth Workshop on Two-Phase Flow Predictions, University of Erlangen, Germany, March 19-22, 1990.
- (Serizawa et al. 1991) Serizawa, A. et al.: *MHD effect on NaK-Nitrogen two-phase flow and heat transfer in a vertical round tube*. Int. Journal of Multiphase Flow, vol. 17, No. 5, p. 761-788, 1991.
- (Serizawa et al. 1997) Serizawa, A., Kamei, T.; Kataoka, I.: *Application of Ultrasonic Echo Technique to the Measurement of 2-dimensional Local Instantaneous Liquid Film Thickness on a Simulated Nuclear Fuel Rod*. OECD/CSNI Specialist Meeting on Advanced Instrumentation and Measurement Techniques, Santa Barbara, Ca., March 17-20, 1997.
- (Skerl, Specht 1994) Skerl, O.; Specht, O.: *Wigner-Verteilung als Werkzeug zur Zeit-Frequenz-Analyse nichtstationärer Signale*. Technisches Messen 61 S. 17-15, R. Oldenbourg Verlag, München, 1994.
- (Skudrzyk 1954) Skudrzyk, E.: *Die Grundlagen der Akustik*. Springer-Verlag, Wien, 1954.
- (Spindler, Hahne 1995) Spindler, K.; Hahne, E.: *Statistical Analysis of local void Fraction for Flow Pattern Identification in a natural and forced convection two-phase flow loop*. Eds. Celata, G.P.; Shah, R.K.: Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, p. 1339-1349, 1995.
- (Strobach 1985) Strobach, P.: *Schnelle adaptive Algorithmen zur ordnungsrekursiven kleinste-Quadrate-Schätzung autoregressiver Parameter*. Dissertation, Universität der Bundeswehr, München, 1985.
- (Taitel 1990) Taitel, Y.: *Flow Pattern Transition in Two-Phase Flow*. Proceedings 9th International Heat Transfer Conference (Jerusalem), Ed. Hetsroni, G., Hemisphere Publishing Corp., p. 237-254, 1990.
- (Takeda 1987) Takeda, Y.: *Measurement of Velocity Profile of Mercury Flow by Ultrasound Doppler Shift Method*. Nuclear Technology, Vol. 79, October 1987.
- (Takeda 1991) Takeda, Y.: *Development of an ultrasound velocity profile monitor*. Nuclear Engineering and Design 126(1991), p. 277-284.

- (Tutu 1982) Tutu, N.K.: *Pressure fluctuations and flow pattern recognition in vertical two-phase flows*. Int. J. Multiphase Flow. Vol. 8, No.4, p. 443-447, 1982.
- (Uhlmann 1989) Uhlmann, G.: *Sensoren für die Schallemission*. 8. Fischlandkolloquium, Tagungsbericht der Hochschule für Seefahrt Warnemünde-Wustrow, S. 33-61, Wustrow, 28.-29.9.1989.
- (Verberk 1991) Verberk, B.L.G.: *An ultrasonic system for the monitoring of two-phase flow parameters in a nuclear power plant primary heat transport system*. Canadian Nuclear Society Bulletin (Canada) (Spr. 1991) v. 12(1) p. 16-18. Conference: CNS/CNA student conference, Kingston (Canada), 22-23 March 1991.
- (Vince, Lahey 1982) Vince, M.A.; Lahey, R.T.: *On the Development of Objective Flow Regime Indicator*. Int. J. Multiphase Flow 8, p. 93-124, 1982.
- (Vu 1988) Vu, Xuan-Nha: *Modellierung der kritischen Zweiphasenströmung in Rohrleitungen beliebiger Länge*. Hannover, Univ., Diss., 1988.
- (Wesser et al. 1983) Wesser, U.; Bors, J.; Immink, J.; Lickteig, K.; Kosok, N.; Stinner, W.: *Untersuchungen von statistischen Signalkomponenten zur Beschreibung der Strömungsform in einer Zweiphasenströmung*. EURATOM, Abschlußbericht 1110-79-06 SISPD, 1983.
- (Whitehouse et al. 1991) Whitehouse, J.C.; Eghbali, D.A. & Co.; Aiken, SC (United States); Flitton, V.E. Idaho Falls, ID (United States); Anderson, D.G. (Wyle Labs., Norco, CA (United States): *Measurement of two-component flow using ultrasonic flowmeters*. Westinghouse Savannah River Co., Aiken, SC (United States) Funding Organisation: Dep. Conference: American Society of Mechanical Engineers (ASME) annual winter meeting, Atlanta, GA 1-6, Dec 1991.
- (Whitehouse, Eghbali 1991) Whitehouse, J.C.; Eghbali, D.A.: *Measurement of two-component flow using ultrasonic flowmeters*. Transactions of the American Nuclear Society v. 63 (1991), p. 454-455.
- (Wisotzki, Wisotzki 1994) Wisotzki, C.; Wisotzki, F.: *Lernfähige Klassifikation von Zeitreihen*. Automatisierungstechnik 70-76, R. Oldenbourg Verlag, München, 1994.

- (Wolf 1988a) Wolf, J.: *Ultrasonic tomography in the field of flow measurement*. J. Acoust. Soc. Am., Suppl. (15 Apr 1988) v. 83 (1) p. 104-115.
- (Wolf 1988b) Wolf, J.: *Investigation of bubbly flow by ultrasonic tomography*. Particle & particle systems characterization 5(1988)4, p. 170-173.
- (Xu 1988) Xu, L.A.: *The pulsed ultrasonic cross-correlation flowmeter for two-phase flow measurement*. J. Phys., E (London), Sci. Instrum. (Apr 1988) v. 21(4), p. 406-414.
- (Xu, Leonard 1985) Xu, L.A.; Leonard, D.: *A pulsed ultrasound transducer system for two-component flow*. J. Phys., E (London), Sci. Instrum. (Jul 1985) v. 18(7), p. 609-613.

13.2 Formelsammlung

Formelzeichen	Bedeutung
a_j	Filterkoeffizienten
c	Schallgeschwindigkeit
d	Distanz von Merkmalsvektoren innerhalb einer Metrik (z.B. der Euklidischen Metrik)
d_i	Innendurchmesser
E	Vorhersagefehler bei VLN, Erkennungsrate
f	Frequenz
Fr	Froude-Zahl
G_D	Dampfmassenstromdichte
H	Histogramm
h_k	Histogrammwert
l	Schallintensität
l_0	emittierte Schallintensität
J	Volumenstromdichte, Leerrohrgeschwindigkeit
L	Länge einer Küstenlinie bei FRC
L/D	Verhältnis Länge zu Durchmesser
M	Merkmalsvektor
m bzw. \bar{m}	Komponente des Merkmalsvektors
N bzw. n	Anzahl (von Elementen)
P_{el}	elektrische Leistung
p_s	Sättigungsdruck
T	Temperatur
t	Zeit

Formelzeichen	Bedeutung
t_{mess}	Meßzeit
U	Spannung
u_i	Zeitreihe
V	Volumenstrom
β	Gasvolumenstromanteil
Δt	Zeitdifferenz
$\Delta t_{E,i}$	Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Extrema ($i, i + 1$) im Schwankungsanteil eines Signals bei VLN
Δt_{Tast}	Tastzeit
$\bar{\delta}$	Güte einer Klassifizierung
ε_i	additive Signalstörung bei VLN
Λ	Koeffizient zur Beschreibung der physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit
ρ	Dichte
Σ	Summe

Indizes	Bedeutung
0	Index für Bezugsgröße bzw. Ursprungsgröße
i bzw. j bzw. k	Index für laufende Nummer
id	Index für identifiziert
L	Index für die gasförmige Phase (Luft)
R	Index für den Reflexionsanteil
T	Index für den Transmissionsanteil
tr	Index für trainiert
w	Index für die flüssige Phase (Wasser)

13.3 Glossar

ADC	Analog-Digital-Konverter
DTE	Mustererkennungsverfahren: Differenz der Zeit zwischen Extremwerten
FRC	Mustererkennungsverfahren: fraktales Verfahren
FZR	Forschungszentrum Rossendorf
K2K	Ultraschall-Sensoren vom Typ K2K
KT	kontinuierliche Transmission
LNA-4	Schallemissionsaufnehmer vom Typ LNA-4
MIN	Minimum
PE	Puls-Echo-Verfahren mit Pulsfolgefrequenz 600 Hz
PEN	Puls-Echo-Verfahren mit Pulsfolgefrequenz 3 kHz
PT	Puls-Transmissions-Verfahren mit Pulsfolgefrequenz 600 Hz
PTN	Puls-Transmissions-Verfahren mit Pulsfolgefrequenz 3 kHz
VLN	Mustererkennungsverfahren: lineares Vorhersagemodell

13.4 Bildverzeichnis

- Bild 2.1 Grundidee der Messung der Parameter in Zweiphasenströmungen mit Hilfe von Mustererkennungsverfahren
- Bild 2.2 Grundsätzlicher Aufbau des Meßsystems zur simultanen Identifizierung der Volumenströme von Gas und Flüssigkeit. Als Referenzmuster dienen die charakteristischen Signalmuster aus den Ultraschallsignalen, die als Vorwissen der Mustererkennungseinheit zur Verfügung stehen
- Bild 4.1 Ansicht der kleinen Testschleife
- Bild 4.2 Prinzipdarstellung der kleinen Testschleife
- Bild 4.3 Teilansichten der Zweiphasen-Testschleife des Instituts für Sicherheitsforschung
- Bild 4.4 Prinzipdarstellung der Zweiphasen-Testschleife des Instituts für Sicherheitsforschung
- Bild 4.5 Gerätefehler bei der Messung des Luftvolumenstroms
- Bild 4.6 Gerätefehler bei der Messung des Wasservolumenstromes
- Bild 4.7 Schallemissionsaufnehmer vom Typ LNA-4
- Bild 4.8 Ankopplung der Sensoren vom Typ LNA-4 an die horizontale Teststrecke
- Bild 4.9 Blockschaltbild der Ultraschall-Meßkette bei Verwendung der Schallemissionsaufnehmer vom Typ LNA-4
- Bild 4.10 Geräteapparatur für die Messungen mit den Schallemissionsaufnehmern vom Typ LNA-4
- Bild 4.11 Wellenleitersensor
- Bild 4.12 Ankopplung der Wellenleitersensoren an die horizontale Teststrecke
- Bild 4.13 Schematische Darstellung der Ultraschall-Meßkette mit Wellenleitersensoren
- Bild 4.14 Geräteapparatur für die Messungen mit den Wellenleitersensoren
- Bild 4.15 Testmatrix für die Luft-Wasser-Versuche
- Bild 5.1 Schematische Darstellung der Messung der Volumenstromdichten von Flüssig- und Gasphase mit Hilfe der Mustererkennung
- Bild 5.2 Frequenzgang des Savitzky-Golay-Filters 5. Ordnung bei verschiedener Blocklänge m
- Bild 5.3 Varianten für Mustererkennungsverfahren

- Bild 6.1 Gegenüberstellung der Merkmalsextraktionsverfahren
- Bild 6.2 Verteilung der Erkennungsrate in der Testmatrix für das fraktale Merkmalsextraktionsverfahren FRC bei gepulstem Transmissionsbetrieb PTN
- Bild 6.3 Verteilung der Erkennungsrate beim Verfahren FRC / PTN unter Ausklammerung des ungünstigen Bereichs
- Bild 6.4 Verteilung der Erkennungsrate bei Merkmalsextraktion nach dem polaren Verfahren DTE und 3 kHz Puls-Echo-Betrieb (PEN)
- Bild 6.5 Verteilung der Erkennungsrate bei Merkmalsextraktion mit dem linearen Vorhersagemodell VLN und Puls-Echo-Betrieb mit 3 kHz (PEN)
- Bild 6.6 Wirkung der Filterung des primären Meßsignals auf die Erkennungsrate beim polaren Merkmalsextraktionsverfahren DTE, Savitzky-Golay-Filter, Ordnung $n=5$, Blocklänge $m=5$
- Bild 6.7 Einfluß von Ordnung n und Blocklänge m der Signalfilterung auf die Erkennungsrate beim polaren Merkmalsextraktionsverfahren DTE, Puls-Transmission, 3 kHz (PTN)
- Bild 6.8 Wirkung der Signalfilterung bei den Verfahren FRC und VLN
- Bild 6.9 Einfluß der Metrik auf die Erkennungsrate am Beispiel des fraktalen Merkmalsextraktionsverfahrens FRC, Puls-Transmission mit 3 kHz (PTN)
- Bild 6.10 Einfluß der Ordnung des linearen Vorhersagemodells VLN auf die Erkennungsrate
- Bild 6.11 Einfluß der Meßzeit und der Anzahl der Trainingsstichproben am Beispiel des fraktalen Merkmalsextraktionsverfahrens FRC
- Bild 6.12 Übersicht über das Klassifizierungsergebnis mit dem fraktalen Merkmalsextraktionsverfahren FRC für die vertikale Testsektion, Durchmesser 51,2 mm, Signalgewinnung durch Puls-Transmission, 3 kHz (PTN), 2 Trainingsstichproben, Meßzeit 10 s
- Bild 7.1 Ergebnis der Klassifizierung mit dem fraktalen Verfahren FRC in Abhängigkeit vom Durchmesser der vertikalen Rohrleitung, Meßzeit 10 s, 2 Trainingsstichproben
- Bild 7.2 Klassifizierungsergebnis in der 29 mm-Leitung, fraktales Verfahren, Puls-Transmission
- Bild 7.3 Klassifizierungsergebnis in der 29 mm-Leitung innerhalb des eingeschränkten Volumenstrombereichs (Pfeile - Zuordnung der Fehlklassifizierungen)

- Bild 7.4 Verteilung der Erkennungsrate innerhalb der Volumenstrommatrix in der 81 mm-Leitung, Merkmalsextraktion FRC, kontinuierlicher Transmissionsbetrieb (KT)
- Bild 7.5 Erkennungsraten an der vertikalen Rohrleitung bei erhöhter Temperatur, Meßzeit 5 s, Trainingsstichproben: 2
- Bild 7.6 Zuordnung der Testpunkte bei erhöhter Temperatur zu Trainingsstichproben aus Messungen bei Normaltemperatur
- Bild 7.7 Zuordnung der Testpunkte aus der Serie V5KT_T zu den Trainingstestpunkten, wenn die Temperatur falsch klassifiziert wurde (nur 6 % der klassifizierten Punkte!)
- Bild 8.1 Erkennungsraten bei der kontinuierlichen Durchschallung (KT) der horizontalen Rohrleitung, Meßzeit 10 s
- Bild 8.2 Verteilung der Erkennungsrate innerhalb der Volumenstrommatrix, horizontale Transmission der horizontalen Rohrleitung, Verfahren FRC / KT, Meßzeit 10 s (grau hinterlegt: Bereiche mit schlechter Erkennungsrate)
- Bild 8.3 Ergebnis der Zuordnung von drei Testpunkten aus der Serie H5KTHU_T (erhöhte Temperatur) zu den Trainingsdaten H5KTHU (Normaltemperatur)
- Bild 9.1 Abhängigkeit der mittleren Amplitude und der Standardabweichung der Amplitude des Ultraschall-Transmissionssignals (kontinuierliche Transmission, KT) von den Volumenstromdichten von Luft und Wasser in der vertikalen Rohrleitung von 51,2 mm Durchmesser
- Bild 9.2 Gesamtvarianz der optimalen Partition für die verschiedenen Rohrlängendurchmesser
- Bild 9.3 Optimale Partitionen in Abhängigkeit von der Anzahl der Gruppen am Beispiel der Rohrleitung mit dem Durchmesser 51,2 mm
- Bild 9.4 Vergleich verschiedener Strömungskarten aus der Literatur
- Bild 9.5 Optimale Partitionen für die verschiedenen Durchmesser in Gegenüberstellung mit der Strömungskarte nach Dukler & Taitel (1977)
- Bild 9.6 Ausgewählte radiale Profile des lokalen Gasgehalts in der vertikalen Testsektion von 51,2 mm Durchmesser
- Bild 9.7 Strömungsbereich mit ausgeprägtem Randmaximum (ausgefüllte Punkte) der Gasgehaltsverteilung, gemessen mit Nadelsonden, $d_i = 51,2$ mm
- Bild 9.8 Gegenüberstellung des Klassifizierungsergebnisses für die vertikale Rohrleitung, Durchmesser 51,2 mm, Verfahren FRC / PTN (vgl. Bild 6.2), mit

der Strömungskarte nach Dukler & Taitel (1977) sowie der Ergänzung von Annunziato et al. (1987)

- Bild 9.9 Gegenüberstellung des Klassifizierungsergebnisses für die vertikale Rohrleitung, Durchmesser 29 mm, Verfahren FRC / PT (vgl. Bild 7.2), mit der Strömungskarte nach Dukler & Taitel (1977) sowie der Ergänzung von Annunziato et al. (1987)
- Bild 10.1 Ergebnisse der Klassifizierung der Testdaten aus den Versuchen mit Dampfbetrieb, Verfahren FRC und VLN ohne Filterung, Meßzeit: 5 s (bei PE und PT), 10 s (bei KT), 2 Trainingsstichproben
- Bild 11.1 Prinzip der Höhenstandsmessung mit Hilfe des Impuls-Echo-Verfahrens
- Bild 11.2 Typische Signalverläufe bei den Höhenstandsmessungen mittels Sensortyp K2K; links bei einem Höhenstand von 300 mm, rechts bei einem Höhenstand von 700 mm
- Bild 11.3 Darstellung der Gesamtlaufzeit des emittierten Ultraschallimpulses beim Impuls-Echo-Verfahren unter Verwendung des Ultraschallprüfköpfes K2K
- Bild 11.4 Typische Signalverläufe bei den Höhenstandsmessungen mittels Sensortyp LNA-4; links bei einem Höhenstand von 300 mm, rechts bei einem Höhenstand von 700 mm
- Bild 11.5 Prinzip der Durchschallung in vertikaler und horizontaler Richtung
- Bild 11.6 Darstellung des Signalmittelwertes in Abhängigkeit vom Höhenstand bei vertikaler Durchschallung, Sensortyp LNA-4
- Bild 11.7 Klassifizierung des Wasserhöhenstandes bei vertikaler Durchschallung, Lufteinperlung, Sensortyp LNA-4

13.5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Mögliche nominelle Bezeichnungen für Hauptformen der Strömung für vertikale und horizontale Strömungskanäle
Tabelle 2.2	Vorschläge für Parameterkombinationen zur Kartierung der Strömungsformen
Tabelle 2.3	Dichten und Schallgeschwindigkeiten von Luft und Wasser bei 20°C
Tabelle 3.1	Einige Arbeiten zur Identifikation der Strömungsform anhand der statistischen Analyse der Meßsignale
Tabelle 3.2	Einige Arbeiten zur Anwendung von Ultraschall zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten, Gasanteilen und/oder Blasen- größen
Tabelle 4.1	Zusammenfassung der wichtigsten Parameter der Zweiphasen- Testschleife
Tabelle 4.2	Einstellwerte für die Luft-Wasser-Versuche
Tabelle 4.3	Einstellwerte für die Wasser-Wasserdampf-Versuche
Tabelle 6.1	Testserien für die Optimierung des Mustererkennungsverfahrens, vertikale Rohrleitung, Innendurchmesser 51,2 mm, Atmosphä- rendruck, Normaltemperatur (20°C)
Tabelle 6.2	Erkennungsraten beim fraktalen Merkmalsextraktionsverfahren, vertikale Wasser-Luft-Strömung, Signalaufnahme mit Puls- Transmissionsverfahren, Pulsfolgefrequenz 3 kHz, 2 Trainings- stichproben, City-Block-Metrik
Tabelle 7.1	Testserien bei der Variation des Rohrleitungsdurchmessers
Tabelle 7.2	Erkennungsraten beim fraktalen Merkmalsextraktionsverfahren, vertikale Wasser-Luft-Strömung, Durchmesser 29 mm, Signal- aufnahme mit Puls-Transmissionsverfahren, Pulsfolgefrequenz 600 Hz, 2 Trainingsstichproben, City-Block-Metrik
Tabelle 7.3	Testserien mit erhöhter Temperatur
Tabelle 7.4	Erweiterung der Trainingsstichproben um den Parameter Tempe- ratur (Verfahren FRC / PT, Meßzeit 15 s, 20°C = V5PT, 80°C = V5PT_T
Tabelle 8.1	Meßserien an der horizontalen Testsektion bei Luft-Wasser- Betrieb
Tabelle 8.2	Ergebnis der Untersuchung der Übertragbarkeit bei Veränderung der Einlaufbedingungen, Verfahren FRC / KT, Meßzeit 30 s

13.6 Zeitlicher Ablauf des Vorhabens

Gegenüber der ursprünglichen Planung ergaben sich zeitliche Verschiebungen, da sich der Abschluß der Baumaßnahmen als Voraussetzung für den Aufbau einer neuen Testschleife im Institut für Sicherheitsforschung um ca. 1 Jahr verzögerte. Die Laufzeit des Vorhabens wurde im Zusammenhang damit um 10 Monate bis zum 31. Oktober 1996 kostenneutral verlängert, wobei Sachmittel in Gehaltsmittel umgewidmet wurden. Der zeitliche Ablauf ist der nachfolgenden grafischen Darstellung zu entnehmen.

