

Archiv-Ex.:

FZR-204

Dezember 1997

Herausgeber: H.-M. Prasser

Workshop

“Meßtechnik für stationäre und transiente Mehrphasenströmungen”

06. - 07. November 1997 in Rossendorf

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

Workshop

"Meßtechnik für stationäre und transiente Mehrphasenströmungen"

06.-07. November 1997 in Rossendorf

Veranstalter:

Forschungszentrum Rossendorf e.V., Institut für Sicherheitsforschung

**Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik (IPM) an der
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Sozialwesen Zittau/Görlitz (FH)**

**DECHEMA - Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische
Technik und Biotechnologie e. V.**

Vorwort	1
---------	---

I. Optische Verfahren

Ermittlung der Blasengeschwindigkeit einer Luft/ Wasser- Spaltströmung mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitskinematographie Körner, S., Friedel, L.; TU Hamburg-Harburg	3
Einsatz eines optischen Verfahrens zur Analyse von Blasenströmungen Wunderlich, B., Kecke, H.-J.; Universität Magdeburg	13
Entwicklung und Einsatz eines Laser-Doppelpulsverfahrens zur optischen Untersuchung der Dynamik von Kavitations- erscheinungen in einer schnell durchströmten, planaren Düse Roosen, P., Kluitmann, S.; Rheinisch-Westfälische Hochschule Aachen	23
Meßtechnik zur Untersuchung transienter Transportprozesse in Mehrphasensystemen: Die Gaszusammensetzung in unmittelbarer Nähe der Oberfläche von Mikrotropfen Moritz, H., Schweiger, G.; Ruhr-Universität Bochum	31
Transiente Strömungsvorgänge in Rohrleitungen, Visualisierung und Berechnung von Kavitation in Rohrleitungssystemen hinter schnellschließenden Regelklappen Dudlik, A., Schlüter, S.; UMSICHT Oberhausen Prasser, H.-M.; Forschungszentrum Rossendorf	39

II. Elektrische Verfahren

Transientes Verhalten einer zweiphasigen Schwallströmung in horizontalen Rohren - Messen von instationären Phasenverteilungen Grotjahn, K., Mewes, D.; Universität Hannover	51
Erfahrungen mit nadelförmigen Leitfähigkeitssonden zur Bestimmung von Parametern in Zweiphasenströmungen Fleischer, S., Hampel, R.; HTWS Zittau/Görlitz	53
Leitfähigkeitssensoren für die Bestimmung von Parametern in einer Zweiphasenströmung Prasser, H.-M.; Forschungszentrum Rossendorf	64

III. Ultraschall

- Ultraschall-Doppler-Meßtechnik zur Diagnose instationärer Mehrphasen-Strömungsvorgänge
Specht, O., Fiedler, O.; Universität Rostock, FB Elektrotechnik
Skerl, O.; Bad Doberan 72
- Anwendung einer neuartigen Ultraschallmeßtechnik zur Bestimmung von Strömungsregimen und Füllständen in Wasser/Dampf-Systemen
Alt, S., Lischke, W.; HTWS Zittau/Görlitz
Melnikov, V. I.; TU Nizhni Novgorod 78
- Messung der Füllhöhe von transienten Zweiphasenschwallströmungen in Rohrleitungen mittels Ultraschall
Hofmann, B., Rockstroh, M.; TU Dresden 91

IV. Sonstige

- Füllstandsmessung auf der Basis der Detektion interner Gammastrahlungsquellen (FMDIG), Anwendung neuronaler Netze zur Füllstandsmessung an Kernreaktoren
Dräger, F., Hampel, R.; HTWS Zittau/Görlitz 99
- Radarsensor zur Gasdetektion in Flüssigkeiten
Kunze, C.; MicAS Elektronik GmbH u. Co. KG Oelsnitz 105
- Finite-Volumen Berechnung von Zweiphasenströmungen in Lagrangescher und Eulerscher Beschreibung
Fogt, H.; Technikum Joanneum Graz
Kneer, A.; Batelle Ingenieurtechnik GmbH Eschborn
Seidl, V.; ICCM Institute of Computational Continuum Mechanics GmbH Hamburg 116

Vorwort

Es gibt kaum ein anderes Gebiet der Physik, das eine vergleichbare Vielfalt der Erscheinungen aufweist, wie Strömungen von Mehrphasengemischen. Entsprechend groß sind die Wünsche der Experimentatoren hinsichtlich der Meßtechnik: Neben den klassischen Parametern Druck, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit wird eine möglichst hoch auflösende Erfassung der momentanen Phasenverteilung benötigt. Außerdem bestehen die Phasen selbst häufig aus mehreren Komponenten, deren Konzentration ebenfalls gemessen werden soll. Den enormen Fortschritten, die mit laseroptischen und den tomographischen Verfahren in letzter Zeit gemacht wurden, steht nach wie vor eine lange Liste bisher ungelöster Aufgaben gegenüber, vor allen Dingen, wenn berührungslos gemessen werden soll. Die Lösungsansätze sind vielfältig, der Bedarf an Erfahrungsaustausch ist groß, der Vergleich der Meßverfahren untereinander muß verstärkt werden.

Diesen Zielen hatte sich der Workshop "Meßtechnik für stationäre und transiente Mehrphasenströmungen" verschrieben, die erste Veranstaltung dieser Art in Rossendorf. Es ist sehr schön, daß wir nun auf eine gute Resonanz und ein sehr schönes Treffen zurückblicken können. Die positive Einschätzung vieler Teilnehmer ermutigt uns, diesen Workshop im nächsten Jahr wieder durchzuführen und so vielleicht zu einer Tradition werden zu lassen. Diesmal stand die Präsentation verschiedener Meßverfahren aus dem Blickwinkel des jeweiligen Untersuchungsgegenstandes im Vordergrund. Vielleicht gelingt es, in Zukunft auch zunehmend Beiträge zum Vergleich verschiedener Meßverfahren und zur Bewertung der Meßgenauigkeit ins Programm aufnehmen zu können. Für das Gelingen des ersten Workshops gebührt allen Teilnehmern, besonders aber den Vortragenden, der Dank der Veranstalter.

gez. Prof. Frank-Peter Weiß
Direktor des Instituts für Sicherheitsforschung
im Forschungszentrum Rossendorf e.V.

gez. Prof. Rainer Hampel
Direktor des Instituts für Prozeßtechnik, Prozeß-
automatisierung und Meßtechnik (IPM) e.V. an
der HTWS Zittau/Görlitz (FH)

Ermittlung der Blasengeschwindigkeit einer Luft/Wasser-Spaltströmung mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitskinematographie

Dipl.-Ing. St. Körner, Prof. Dr.-Ing. L. Friedel, TU Hamburg-Harburg

Zur Vorhersage des sich bei gegebener Druckdifferenz einstellenden Massenstroms eines Zweiphasengemischs durch enge Spalte ist neben der Zustandsänderung der Gasphase während der Druckabsenkung u. a. auch die Kenntnis des sich dabei einstellenden fluiddynamischen Ungleichgewichts in Form einer Relativgeschwindigkeit zwischen den Phasen von Bedeutung. Diese beiden Einflüsse wurden mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitskinematographie für eine Wasser/Luft-Blasenströmung untersucht.

Abgesehen von der raschen Druckabsenkung aufgrund der plötzlichen Querschnittsverengung im Spalteintritt treten keine nennenswerten Unterschiede zwischen den experimentell ermittelten und den unter der Annahme einer isothermen Zustandsänderungen berechneten Volumenänderung verschieden großer Blasen auf. Die mittlere Geschwindigkeit der Blasen unterscheidet sich dabei nicht wesentlich von der unter der Annahme einer homogenen Strömung berechneten.

Problem / Ziel

Für die Vorausberechnung des durch Wandrisse druckführender Anlagenteile austretenden (Leck-)Massenstroms, in der Regel ein Gemisch aus Flüssigkeit und koexistierendem Dampf oder Gas, wird neben der Kenntnis des auftretenden Siede- oder Entlöseverzuges bzw. der Zustandsänderung des Gemischs u. a. die Größe des sich einstellenden fluiddynamischen Ungleichgewichts in Form einer Relativgeschwindigkeit zwischen den Phasen bzw. der Schlupf benötigt. Bei diesem Ausströmvorgang sind wegen der nur kurzen Weglänge bzw. Rißtiefe und der plötzlichen Querschnittsänderung am Rißeintritt die Einlaufstörungen noch nicht abgeklungen. Somit liegt praktisch keine ausgebildete Zweiphasen-Strömung vor. Eine Übertragbarkeit der bereits bei ausgebildeter Zweiphasenströmungen vorliegenden Meßergebnisse, z. B. in Rohren, dürfte damit per se nicht gegeben sein. Wegen der in der Regel geringen lichten Weite der Behälterrisse in der Größenordnung von 0,5 mm ist weiterhin gegenüber den bisher hauptsächlich untersuchten Strömungen in kreisrunden Rohren bzw. (nahezu) verlustlosen Düsen mit einem größeren Einfluß der Reibung auf das sich einstellende Geschwindigkeitsprofil sowie den Schlupf zu rechnen.

Gemäß den Untersuchungen von H. John et al. [1] und insbesondere von F. Westphal [4] kann eine befriedigende Vorhersage des durch enge Spalte oder Behälterrisse austretenden Zweiphasen-Leckmassenstroms mit dem Modell von P. Pana [2] erreicht werden. Dieses beinhaltet als Untermodell neben dem Widerstandsbeiwert der Einphasen-Flüssigkeitsströmung u.

a. die Annahme einer homogenen, d. h. schlupffreien Strömung sowie eines thermodynamischen bzw. thermischen Gleichgewichts zwischen den beiden Phasen. Speziell für Zweikomponenten-Zweiphasenströmungen ohne Phasenübergang ist nicht auszuschließen, daß eine zutreffende Berechnung des sich einstellenden Massenstroms nur deshalb möglich ist, weil sich einzelne Abweichungen durch vereinfachende, evtl. unrichtige Annahmen in den Untermodellen gegenseitig kompensieren. Das Ziel ist daher die Überprüfung der im Modell von P. Pana verwendeten Annahmen über die postulierte Zustandsänderung der Gasphase sowie die Relativgeschwindigkeit bzw. den Schlupf der beiden Phasen. Hierzu sind mit der Hochgeschwindigkeitskinematographie Aufnahmen von Blasenströmungen in engen Spalten durchgeführt worden. Mit Hilfe von Objekterkennungsalgorithmen und rechnergestützter Bildauswertung wurden die Geschwindigkeiten einzelner Blasen sowie über die Volumenzunahme die Zustandsänderung des in ihnen enthaltenen Gases ermittelt. Eine Änderung des sich einstellenden Strömungsmassendampfgehalts durch einen Phasenübergang mit einem etwa auftretenden Siedeverzug kann bei den zunächst mit Wasser/Luft-Strömung durchgeführten Versuche aufgrund der geringen gegenseitigen Löslichkeit in erster Näherung vernachlässigt werden. Somit ist dabei der Strömungsmassenluftgehalt entlang des Strömungswegs quasi konstant und läßt sich durch Kombination der beiden Einzelmassenströme fest vorgeben.

Spaltmeßstrecke

Die Meßstrecke besteht im wesentlichen aus zwei parallel (zueinander) angeordneten Glasplatten, Bild 1. Diese Anordnung ermöglicht die optische Erfassung der Zweiphasenströmung über die gesamte Länge des Meßspalts. Über die in die Seitenwand des Spalts eingebrachten Bohrungen wird mit Hilfe von Druckaufnehmern zusätzlich der statische Wanddruck entlang der Meßstrecke ermittelt. In einem vor dem Spalt angeordneten fluiddynamischen Beruhigungsraum ist die Zulaufgeschwindigkeit aufgrund des im Vergleich zur Spaltmeßstrecke großen Strömungsquerschnitts so klein, daß dort das Fluid in erster Näherung als ruhend betrachtet werden kann. Der gemessene Wanddruck entspricht dann dem Gesamtdruck. Zur Vermeidung einer Separation der Phasen sowie einer Inversion der Phasengrenzfläche infolge der Schwerkraft in diesem quasi ruhenden Zulauf wird die Meßstrecke vertikal aufwärts durchströmt.

Theoretische Grundlagen

Bei volumetrischen Luftgehalten von kleiner als ca. 50 %, dies entspricht im hier betrachteten Druckbereich von bis zu 10 bar bei Annahme einer schlupffreien Strömung einem Massenluftgehalt von maximal 0,2 %, bildet sich in der Spaltmeßstrecke eine Blasenströmung aus. Insbesondere bei niedrigen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten sind die Durchmesser der dabei auftretenden Blasen erheblich größer als die Spaltweite von rund 0,5 mm. Daher verformen sich die Blasen beim Eintritt in die Spaltmeßstrecke zu flachen Scheiben. Für die rechnerische Bildauswertung können diese in erster Näherung als zweidimensionale Körper angesehen werden. Die Bewegung der Blasen kann damit nur in zwei Raumrichtungen erfolgen. Das Volumen läßt sich dann wegen des parallelen Spalts näherungsweise aus dessen lichter Weite und der Kontaktfläche der Blasen an der Glaswand abschätzen.

Die in einer Blase enthaltene Luftmasse bleibt, wenn kein Kontakt und auch keine Koaleszenz mit einer weiteren Blase auftritt, im Verlauf der Durchströmung des Spaltes nahezu konstant. Aufgrund des Abfalls des statischen Drucks entlang des Strömungswegs steigt das

spezifische Volumen der Luft jedoch an und die Blase expandiert. Je nach der sich einstellenden Zustandsänderung der Luft bzw. dem Wärmeübertrag von der Flüssigkeit an die Blase können sich dabei theoretisch unterschiedliche spezifische Blasenvolumen bzw. Lufttemperaturen einstellen. Im Grenzfall eines vollständigen Wärmeaustauschs zwischen einer Blase und der umgebenden, in erster Näherung bei gleicher Temperatur verharrenden Flüssigkeit¹ bleibt auch die Temperatur der Luft konstant, d. h. die Zustandsänderung bei der Expansion der Blase erfolgt ebenfalls isotherm. Wird dagegen keine Wärme von der Flüssigkeit an das Gas übertragen, expandiert die Blase adiabat. Dadurch ist sowohl die sich einstellende Lufttemperatur als auch das spezifische Volumen z. T. erheblich kleiner als bei Annahme einer isothermen Zustandsänderung. Infolgedessen nimmt das Gesamtvolumen einer Blase entsprechend weniger zu. Mit Hilfe des aus den Filmaufnahmen ermittelten Volumens einer Blase bzw. dessen Änderung in Abhängigkeit des zusätzlich gemessenen statischen Wanddrucks entlang der Strömungsstrecke wurde die Zustandsänderung des Gases in den Luftblasen abgeschätzt.

Infolge der Expansion der Blasen mit sinkenden Druck erhöht sich das Luftvolumen entlang der Strömungsstrecke. Gleichzeitig vergrößert sich dabei auch der volumetrische Luftgehalt bzw. das mittlere spezifische Volumen des Zweiphasengemischs. Aufgrund der über die gesamte Länge konstanten Querschnittsfläche des Spalts resultiert aus dieser Volumenzunahme eine höhere mittlere Strömungsgeschwindigkeit, d. h. das Zweiphasengemisch muß beschleunigt werden. Dies äußert sich u. a. in einem entlang der Strömungsstrecke progressiv abfallenden statischen Druck. Da die Dichten von Wasser und Luft sich jedoch um mehrere Größenordnungen voneinander unterscheiden, würden sich bei identischem längenbezogenem Beschleunigungsdruckabfall und vernachlässigbar kleinem Impulsaustausch zwischen den Phasen für diese auch verschieden große mittlere Geschwindigkeiten einstellen. Als Folge des z. B. bei einer Blasenströmung auftretenden intensiven Impulsaustauschs zwischen den Blasen und der umgebenden Flüssigkeit sowie der Wandreibung werden diese Unterschiede jedoch zumindest teilweise ausgeglichen.

Hochgeschwindigkeitskinematographie und Bildauswertung

Mit der Hochgeschwindigkeitskinematographie kann der Ort einzelner Blasen im Bereich der gesamten Spaltlänge mit einer hohen zeitlichen Auflösung von bis zu $50 \mu\text{s}$, entsprechend 20 000 Bilder pro Sekunde, beobachtet werden. Aufgrund dieser hohen Bildfrequenz ist infolge der entsprechend kurzen Ladezeiten der Blitzlampe die zur Verfügung stehende Lichtenergie pro Bild jedoch äußerst gering. Um trotzdem eine ausreichende Beleuchtung zu ermöglichen, sind die Filmaufnahmen im sog. Durchlichtverfahren durchgeführt worden. Dabei befinden sich die Kamera, die durchleuchtete Meßstrecke, eine auf das Kameraobjektiv fokussierte Sammellinse und die Blitzlampe in einer optischen Ebene. Dieser in der Hochgeschwindigkeitskinematographie häufig angewendete optische Aufbau gewährleistet eine optimale Bündelung des zur Verfügung stehenden Lichts.

Die Größe sowie die lokale Position der Blase zum jeweiligen Zeitpunkt werden mit Hilfe von Auswertungsalgorithmen aus den Filmaufnahmen ermittelt. Hierfür werden diese zunächst di-

¹Durch die Abkühlung des Gases bei Druckabsenkung kommt es bei setes ideal gleichen Temperaturen von Flüssigkeit und Gas zu einer resultierenden Abkühlung beider Phasen. Die Temperaturänderung des Wassers kann für die hier betrachteten niedrigen Massenluftgehalte und Druckdifferenzen jedoch aufgrund einer Enthalpiebilanz in erster Näherung vernachlässigt werden.

gitalisiert und danach in einem Rechner weiterbearbeitet. Da sowohl die Blasen als auch das sie umgebende Wasser optisch durchsichtig sind, lassen sich aufgrund von Lichtbrechung nur die Ränder der Blasen fotografisch mit ausreichender Genauigkeit erfassen, Bild 2 (links) . Durch stufenweise Erhöhung des Bildkontrastes ist es möglich, diese Ränder hervorheben bzw. die Hintergrundinformationen auszublenden. Das so bearbeitete Bild enthält im Prinzip nur noch die hellen Ränder der Blasen vor einem sonst schwarzen Hintergrund, Bild 2 (Mitte) . Anschließend werden die von den Blasenrändern umschlossenen Flächen für jede einzelne Blase integriert und die relative Position des jeweiligen Flächenschwerpunkts ermittelt, Bild 2 (rechts) . Mit Hilfe von Objekterkennungsalgorithmen können dann die jeweiligen Blasen über mehrere Bilder verfolgt werden.

Die relative Volumenzunahme bzw. die Vergrößerung der ermittelten Bildfläche einer Blase in Abhängigkeit des statischen Wanddrucks korrespondiert mit der thermodynamischen Zustandsänderung des in ihr enthaltenen Gases. Im Beruhigungsraum vor der Meßstrecke ruht quasi die Strömung, so daß die mittlere Verweilzeit einer Blase hinreichend lang ist und davon ausgegangen werden kann, daß sich dort das Wasser und die Luft im thermischen Gleichgewicht befinden, d. h. beide Phasen haben die gleiche Temperatur. Beim Einströmen in die Spaltmeßstrecke ändert sich wegen des Beschleunigungsdruckabfalls sowie des parallel auftretenden Stoßverlusts der auf ein Fluidelement wirkende Druck sehr rasch. Daher wird hier davon ausgegangen, daß die Blase in dieser kurzen Zeit keine Wärme mit der umgebenden Flüssigkeit bzw. den Spaltwänden austauscht, d. h. die Expansion erfolgt adiabat. Ausgehend von diesem Anfangszustand läßt sich die folgende Zunahme des Blasenvolumens mit Hilfe der Filmaufnahmen bestimmen. Da mit abnehmendem Blasendurchmesser die spezifische Oberfläche bzw. die volumenbezogene Grenzfläche zwischen den Phasen zunimmt, dürfte der Wärmeaustausch zwischen der Flüssigkeit und kleinen Blasen erheblich schneller erfolgen als bei größeren Blasenradien. Speziell in diesem Fall könnten daher Abweichungen zwischen experimentell bestimmtem Blasenvolumen und dem unter der Annahme eines unmittelbaren Temperaturlausgleichs mit der Flüssigkeit berechneten auftreten.

Zur Ermittlung der Geschwindigkeit einzelner Blasen wurde aufgrund ihrer Expansion die translatorische Verschiebung ihres volumetrischen Schwerpunkts bzw. des Flächenschwerpunkts ihrer fotografischen Seitenfläche an der durchsichtigen Spaltwand betrachtet. Dies ist streng genommen nur dann zulässig, wenn die Gasdichte in der Blase homogen verteilt ist, d. h. Blaseninnendruck und -temperatur im gesamten Volumen identisch sind, was hier näherungsweise angenommen wird. Aus der Verschiebung dieses Schwerpunkts in aufeinander folgenden Bildern läßt sich bei bekanntem Zeitabstand die Blasengeschwindigkeit ermitteln.

Gemäß Y. Sato et al. [3] kann der volumetrische Gas- bzw. Luftgehalt ebener Blasenströmungen bei niedrigen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bzw. bei infolge der Oberflächenkräfte glatten Blasenrändern aus der fotografisch ermittelten Blasenbildfläche im Verhältnis zur Gesamtbildfläche bestimmt werden. Damit ergibt sich für diesen Fall unter Verwendung der Definitionsgleichung des Schlupfes eine (theoretische) Möglichkeit der Überprüfung des ermittelten Schlupfes.

Experimentelle Ergebnisse

Infolge des Druckabfalls in der Meßstrecke expandieren die Blasen bevorzugt in Strömungs-

richtung. Da hierzu jedoch die sie umgebende Flüssigkeit verdrängt werden muß, kann es dabei am Kopf der größeren Blasen zur Bildung von verästelten Gasstrahlen kommen, Bild 3 . Die Ursache hierfür könnten u. a. Wechselwirkungen oder Instabilitäten zwischen den Kräften in der Blasengrenzfläche und denen der Turbulenz der umgebenden Flüssigkeit sein. Die Auswirkungen lassen sich speziell bei größeren Gasblasen beobachten, da hier die Oberflächenkräfte aufgrund des Krümmungsradius' nur eine geringe Stabilisierung der Phasengrenzfläche bewirken. Als Folge bildet sich eine unregelmäßig geformte, große spezifische Phasenkontaktfläche zwischen der Luftblase und der Flüssigkeit aus.

Für eine relativ große Blase mit einer Luftmasse von ca. 0,3 mg wurde beispielhaft das relative Volumen im Fall eines entlang des Strömungsweges abnehmendem statischem Drucks von 7,1 bar auf 1,1 bar ermittelt und den Rechenwerten gemäß einer isothermen sowie einer adiabaten Zustandsänderung gegenübergestellt, Bild 4 . Es ist ersichtlich, daß erwartungsgemäß die relativen Blasenvolumen im Eintrittsbereich näher an der untereren, mit der Annahme einer adiabaten Zustandsänderung berechneten Grenzkurve liegen. Mit zunehmendem Strömungsweg bzw. längerer Verweilzeit nähern sich die ermittelten relativen Blasenvolumina der oberen Grenzkurve einer isothermen Zustandsänderung an. Dies erfolgt bereits nach etwa der Hälfte des Strömungsweges, d. h. nach einer Spaltlänge von ca. 50 mm. Dieser Verlauf der Meßwerte dürfte u. a. darauf zurückzuführen sein, daß sich bei der Durchströmung der Spaltmeßstrecke der statische Druck und damit das thermische Ungleichgewicht zwischen einer Blase und der sie umgebenden Flüssigkeit verglichen mit dem steilen Druckabfall im Strömungseintritt nur noch vergleichsweise langsam ändern. Der gute Wärmeübertrag an die Blase sowie die daraus resultierende geringe resultierende Temperaturdifferenz zwischen der Flüssigkeit und der Blase bzw. deren nahezu isotherme Zustandsänderung könnten mit der großen spezifischen Phasengrenzfläche erklärt werden.

Die Blasengeschwindigkeit wurde exemplarisch für einen Massenluftgehalt von 0,05% bestimmt, Bild 5 . Die Geschwindigkeiten der Blasen in Abhängigkeit von dem Volumen variieren in einem Bereich mit einer maximalen Streubreite von 1,3 m/s . Die Unterschiede lassen sich u. a. auf die unregelmäßige Expansion der Blasen sowie auf deren ausgeprägte Wechselwirkungen mit der umgebenden, turbulent strömenden Flüssigkeit zurückführen. Aufgrund des damit einhergehenden intensiven Impulsaustauschs zwischen den Phasen weichen die zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten der Blasen nicht wesentlich von der unter der Annahme eines homogenen Gemisches, d. h. einer schlupffreien Strömung, berechneten ab. Lediglich für größere Blasen konnten mit steigendem Blasenvolumen höhere mittlere Geschwindigkeiten festgestellt werden. Durch die Ausbildung von längeren Gasstrahlen bei der Expansion der größeren Blasen reduziert sich dabei die für den Impulsaustausch zur Verfügung stehende spezifische Phasengrenzfläche. Hieraus resultiert eine gegenüber kleinen Blasen bzw. der Flüssigkeit erhöhte mittlere Geschwindigkeit. Für alle Blasen ist der Schlupf, als Verhältnis der mittleren Geschwindigkeiten beider Phasen, jedoch immer kleiner als 1,2 .

Die von Y. Sato et al. vorgeschlagenen Methode zur Bestimmung des mittleren volumetrischen Luftgehalts konnte für die vorliegende Spaltströmung mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahmen nicht angewendet werden. Dieses Versagen läßt sich u. a. auf die Größe der Druckdifferenz und die damit verbundene Expansion der Blasen bzw. die entsprechend hohe Zunahme des volumetrischen Gasgehalts entlang der Spaltmeßstrecke zurückzuführen. Weiterhin ist der mittlere volumetrische Luftgehalt eine zeitlicher wie auch räumlich gemittelter Integralwert.

Die vorliegende Blasen sind jedoch auch bei niedrigen Luftgehalten im Vergleich zur gesamten Strömungsquerschnitt z. T. relativ groß. Insofern wäre zur Bestimmung des Luftgehalts eine Mittelung der Ergebnisse über einen längeren Zeitraum notwendig. Dies konnte jedoch aufgrund der begrenzten Aufnahmekapazität der zur Verfügung stehenden Hochgeschwindigkeitskamera nicht verwirklicht werden.

Zusammenfassung

Abgesehen von der adiabaten Zustandsänderung infolge der raschen Druckabsenkung im Spalteintritt expandiert die Luft auch in größeren Blasen nahezu isotherm, d. h. es treten keine nennenswerten Unterschiede zwischen der Temperatur der Luft und der des Wassers auf. Die mittlere Geschwindigkeit der Blasen unterscheidet sich dabei nicht wesentlich von der der Flüssigkeit. Es stellte sich lediglich eine geringe Zunahme der Blasengeschwindigkeit mit dem Blasenvolumen bis zu einem maximalen Schlupf von 1,2 ein. Die quasi homogene Strömung wie auch die näherungsweise identische Temperatur des Gases und der Flüssigkeit sind u. a. auf die Ausbildung von Flüssigkeitsstrahlen bei der Expansion der Blasen infolge der Druckabsenkung und die daraus resultierende große spezifische Phasengrenzfläche zurückzuführen.

Die Autoren danken der DFG für die im Rahmen des Schwerpunktprogramms "Transiente Vorgänge in mehrphasigen Systemen mit einer oder mehreren Komponenten" erhaltene finanzielle Unterstützung.

Literatur

[1] John, H.; Reimann, J.; Westphal, F.; Friedel, L.: Critical two-phase flow through rough slits. Int. J. Multiphase Flow, Vol. 14, No. 2 (1988), 155-174.

[2] Pana, P.: Eine modifizierte Bernoulli-Gleichung für die Berechnung der Strömungsvorgänge im unterkühlten Wassergebiet. Institut für Reaktor Sicherheit W-18, 1975.

[3] Sato, Y.; Sadatomi, M.; Kawahara, A.: An experimental method for measurement of void fraction distribution in a quasi-2D two-phase flow using image processing. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 7 (1993), 202-211.

[4] Westphal, F.: Berechnungsmodell für die Leckraten aus Rissen in Wänden druckführender Apparate und Rohrleitungen. Diss. Univ. Dortmund, 1991.

Definitionen der homogenen Zweiphasenströmung

Geschwindigkeit:

$$\bar{u}_{\text{Hom}} = \frac{\dot{m}_{\text{ges}}}{\rho_{\text{Hom}}}$$

Dichte:

$$\frac{1}{\rho_{\text{Hom}}} = \frac{\dot{x}}{\rho_G} + \frac{1 - \dot{x}}{\rho_F}$$

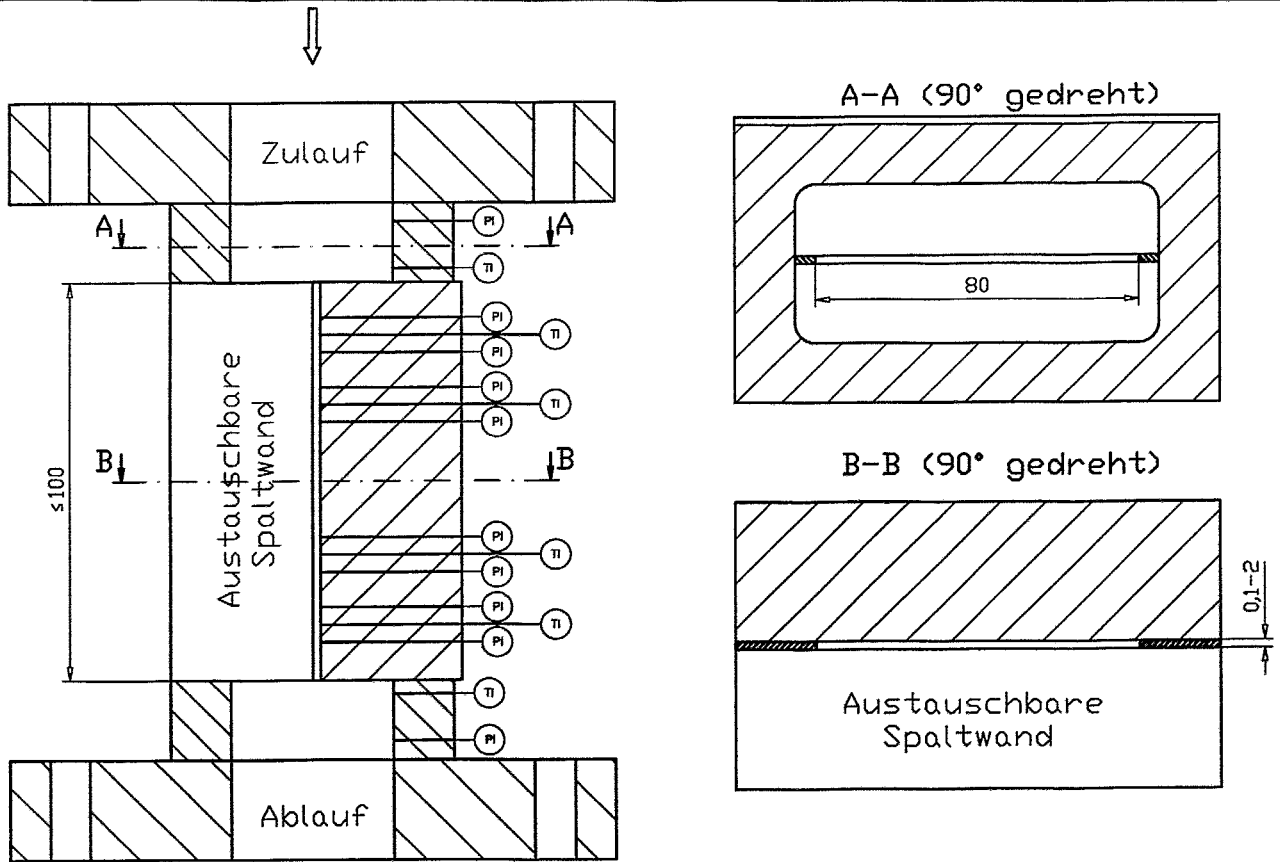


Bild 1: Spaltmeßstrecke mit Druck- und Temperatursensoren

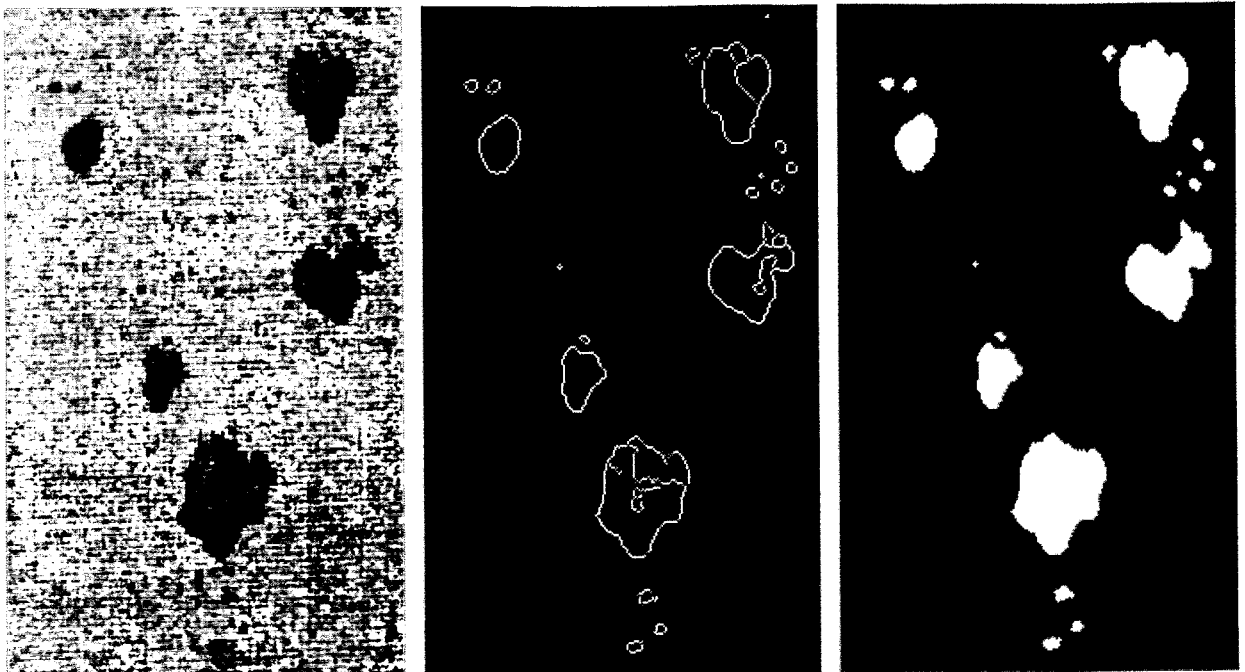


Bild 2: Vorgehensweise von der Blasenerkennung auf dem Original-Bild (links), über die Konturen-Dedektion (Mitte) bis zur Objekt-Erkennung (rechts)

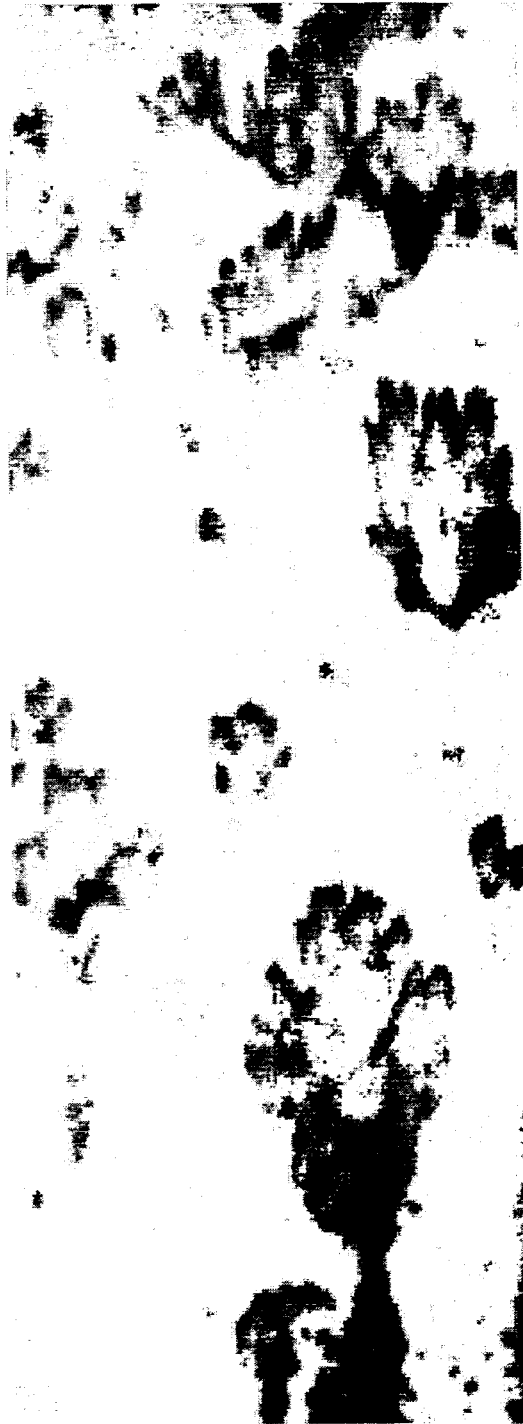


Bild 3: Fotografische Aufnahme einer senkrecht aufwärts gerichteten Wasser/Luft-Strömung in der Spaltmeßstrecke (Weite: 0,5 mm ; Länge: 100 mm) bei einer Druckdifferenz von 4 bar und einem Strömungsmassenluftgehalt von 0,05 %

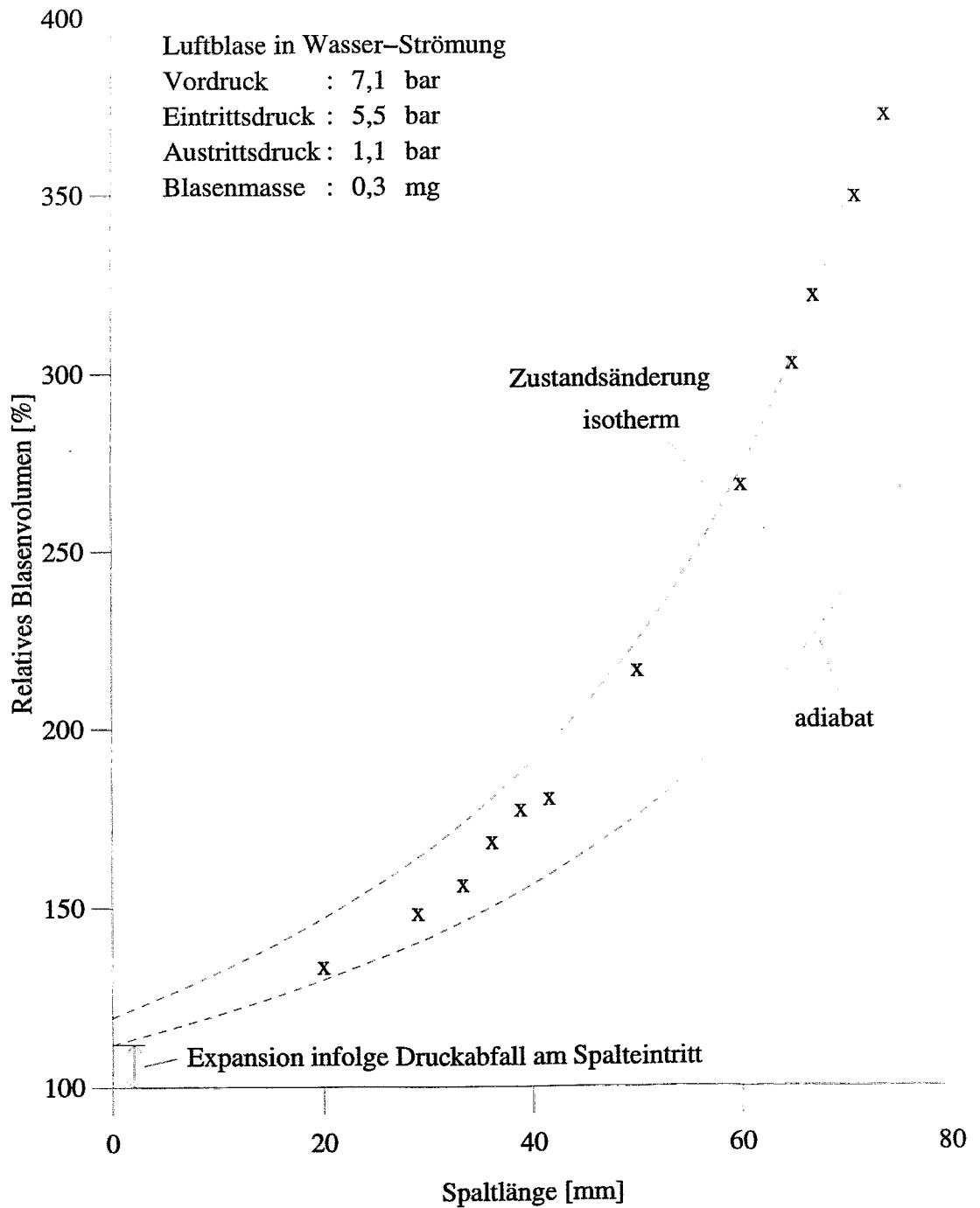


Bild 4: Gemessenes relatives Volumen einer Luftblase in Abhängigkeit von der Spaltlänge bei Durchströmung der Spaltmeßstrecke (Vordruck: 7,1 bar ; Gegendruck: 1,1 bar) und Blasenvolumen bei Annahme einer isothermen bzw. adiabaten Expansion

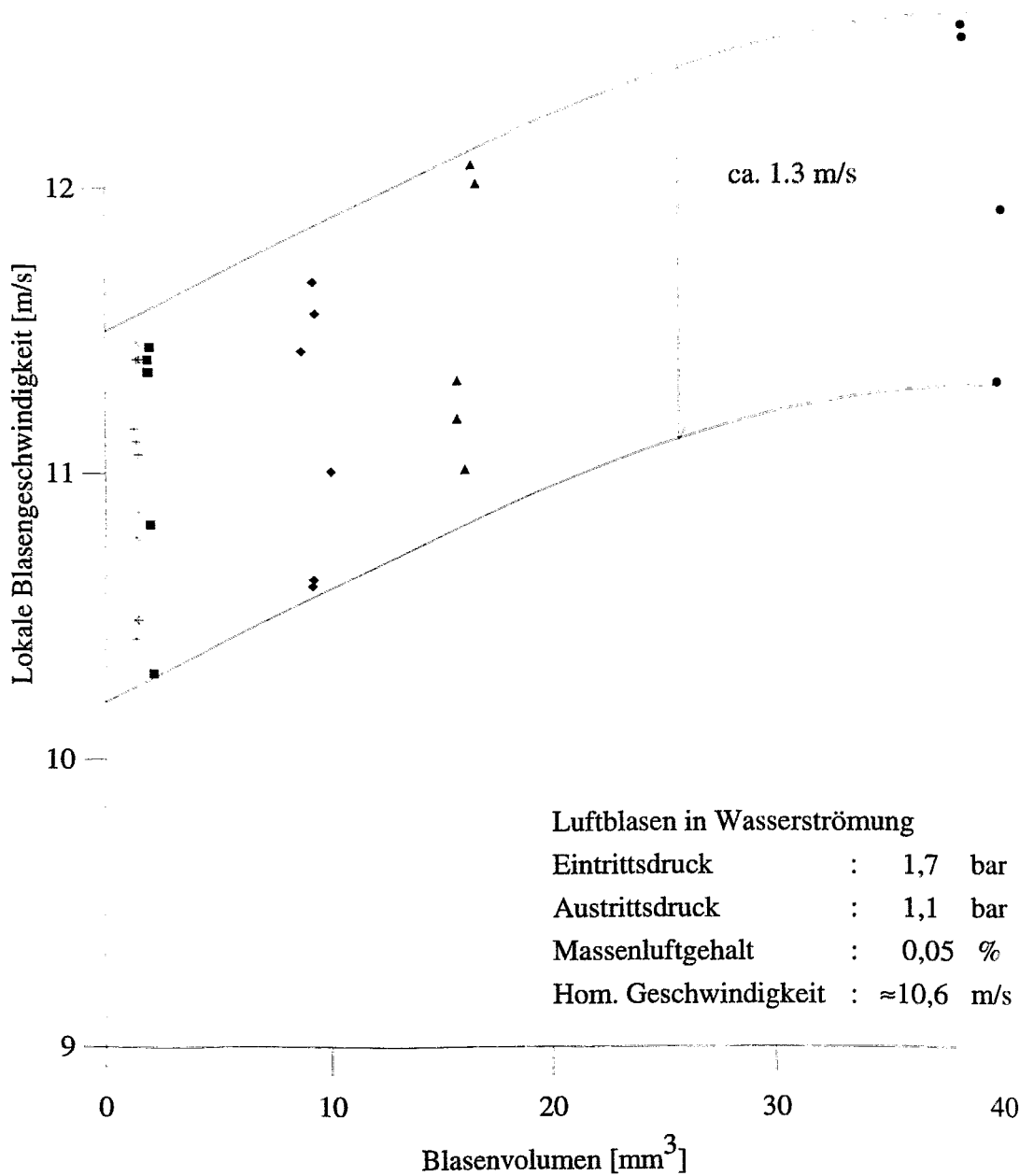


Bild 5: Gemessene Geschwindigkeit der Luftblasen in Abhängigkeit vom Volumen bei einer aufwärts gerichteten Wasser/Luft-Spaltströmung (Weite: 1,1 mm ; Länge: 100 mm) bei einem Eintrittsdruck von 1,7 bar, einem Austrittsdruck von 1,1 bar und einem Massenluftgehalt von 0,05 %

EINSATZ EINES OPTISCHEN VERFAHRENS ZUR ANALYSE VON BLASENSTRÖMUNGEN

Kecke, H.-J.; Wunderlich, B.

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik

1. Einleitung

Zur Charakterisierung von Blasenströmungen in Strömungskanälen sind aus strömungsmechanischer Sicht folgende Meßgrößen zu untersuchen, die, wie zu zeigen sein wird, mit berührungslos arbeitenden Lasermessverfahren erfaßt werden können:

- mittlere Geschwindigkeit beider Phasen getrennt, damit auch der Schlupf
- örtliche Geschwindigkeit beider Phasen in und quer zur Hauptströmungsrichtung
- Phasenverteilung
- Blasengrößenverteilung
- Schwankungsgeschwindigkeit beider Phasen im einzelnen (Bestimmung des Turbulenzgrades), natürlich auch Mischsignale beider Phasen gemeinsam (Geschwindigkeit und Schwankungen)

Die optischen Parameter der bei den hier beschriebenen Untersuchungen eingesetzten LDA sind (siehe Bild 1):

		<u>DANTEC</u>	<u>POLYTEC</u>
- Meßvolumenlänge	l	0,635 mm	2,07 mm
- Meßvolumendurchmesser	h	0,075 mm	0,20 mm
- Streifenabstand	Δx	2,181 μm	4,20 μm
- Wellenlänge	λ		

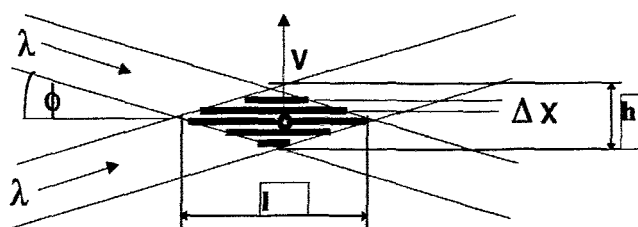


Bild 1: Bezeichnungen am Meßvolumen

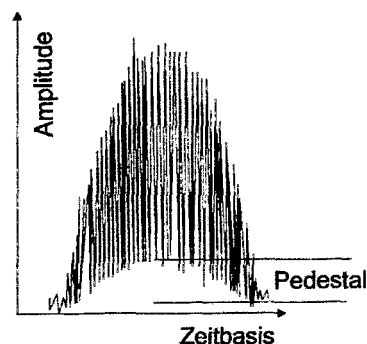


Bild 2: LDA-Burst mit Gleichanteil

In der Regel werden dem Fluid Tracerteilchen zugegeben, die bestimmte Bedingungen zu erfüllen haben. Dabei ergeben Teilchendurchmesser, die dem Streifenabstand entsprechen, ein gut durchmoduliertes Signal. Bei den eigenen Messungen werden Titandioxydteilchen verwendet, die auf einen Durchmesser von 3 μm heruntergemahlen sind. Befinden sich mehrere Partikeln gleichzeitig im Meßvolumen, weil die Teilchenbeladung sehr hoch ist oder weil sich Agglomerate gebildet haben, wird vom Fotosensor eine größere Menge gestreuten Lichtes empfangen, die sich im Meßsignal als erhöhter Gleichanteil, auch als Pedestal bezeichnet, wie im Bild 2 bemerkbar macht.

2. Untersuchungen zur Analyse der von Blasen empfangenen LDA-Signale

Bei hohen Datenraten und geringem Gasvolumenstromanteil haben die vom LDA detektierten Gasblasen keinen signifikanten Einfluß auf die gemessene örtliche Strömungsgeschwindigkeit und den Schlupf. Anders sieht das bei hohen Gasvolumenstromanteilen aus. So werden bei einem Gasvolumenstromanteil von 15% lediglich noch Datenraten in der Größenordnung von 100 Hz erreicht. Daran können durchaus zig Blasendurchgänge beteiligt sein, und das Meßergebnis stellt somit einen Zwischenwert zwischen den örtlichen Größen für die Flüssigkeitsgeschwindigkeit und den Turbulenzgrad sowie den durch die Gasblasenbewegung induzierten entsprechenden Strömungsgrößen dar.

Beim Einsatz der LDA in Blasenströmungen sind zwei Umstände zu berücksichtigen, die Einfluß auf das Meßergebnis haben:

1. Bei Vorhandensein eines Phasenschlupfes kommt es zu zusätzlich induzierten Geschwindigkeitsänderungen, die vom LDA als erhöhte Turbulenz gedeutet werden.
2. Die Anzahl der erfaßten Blasen hat bei vorhandenem Phasenschlupf einen signifikanten Einfluß auf die gemessenen Gemischgrößen.

Es besteht also die Aufgabe, zu erkennen, welches Signal von einem Tracerteilchen der Flüssigkeit und welches Signal von einer Gasblase stammt. Bei einer Analyse der in Bild 3 aufgezeichneten LDA-Bursts lassen sich folgende Unterschiede feststellen:

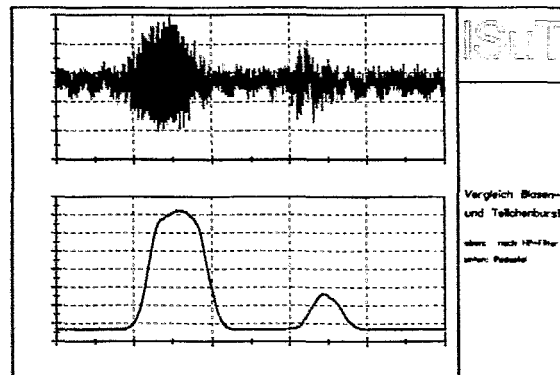


Bild 3: Vergleich der LDA-Bursts von Luftblasen (links) und von Tracerteilchen (rechts) und zugehöriges Pedestal (unten)

1. Das Blasensignal weist ein sehr viel größeres Pedestal auf als das Partikelsignal.
2. Das Blasensignal besitzt eine stärkere Amplitude als das Partikelsignal.

Das war der Anlaß, sich mit den Reflexionsverhältnissen an einer Blase näher zu befassen. Hierzu wurden Beobachtungen an Blasen vorgenommen, die, nachdem sie eine Aufstiegsphase im mit Tracerteilchen versetzten Wasser absolviert hatten, auf einem Mikroskop positioniert wurden.

Der zur Ausleuchtung des Objektes dienende Lichtstrahl erzeugt an der Blasenoberfläche ähnliche Lichtreflexionen wie die Laserstrahlen des LDA (Bild 4 u. 5).

Einzelheit:

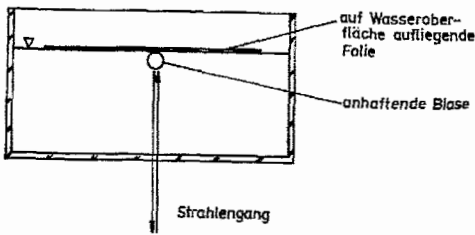


Bild 4: transparentes Kästchen mit aufgelegter Folie und anhaftender Luftblase

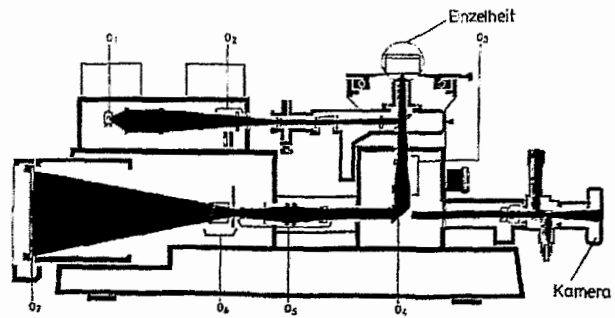


Bild 5: Strahlengang am Mikroskop

Videoaufnahmen der Mikroskopbilder zeigen sehr deutlich, daß starke Lichtreflexe sowohl von der Phasengrenzfläche zwischen Blase und umgebendem Wasser als auch von Titandioxidteilchen, die an der Blasenoberfläche agglomerieren, herühren. Der Größenvergleich mit dem Meßvolumen in Bild 6 erklärt, daß dadurch hohe Gleichanteile (Pedestal) verursacht werden.

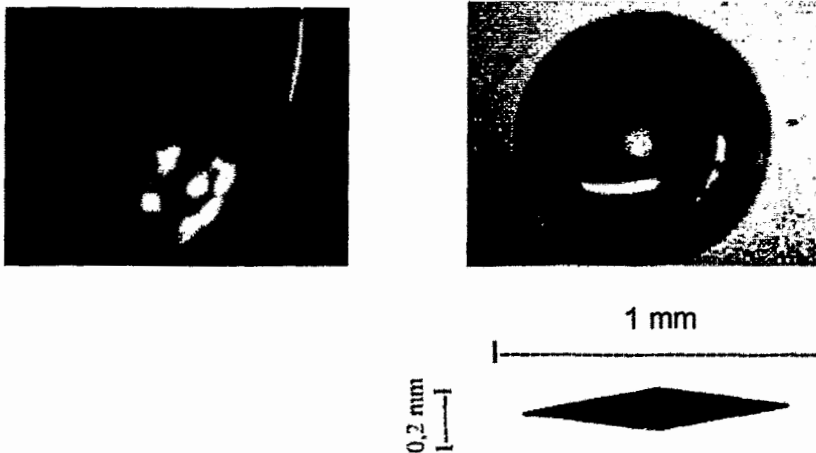


Bild 6: Mikroskopaufnahmen von Lichtreflexen durch Phasengrenzflächen und durch Tracerteilchen an einer Blase

Ist die Längsachse der Reflexionsgebiete senkrecht zur Streifenrichtung im Meßvolumen orientiert, entstehen relativ lange LDA-Bursts. Bei paralleler Lage und besonders dann, wenn die Reflexionsbereiche sehr schmal sind und in der Größenordnung des Streifenabstandes liegen, sind die Signale gut durchmoduliert und weisen eine hohe Amplitude auf, da die gesamte Streifenlänge überstrichen wird.

Eine Blase, die das Meßvolumen diametral durchquert, führt somit zu dem in Bild 7 gezeigten LDA-Signal mit einer Meßlücke bei jedoch hohem Pedestal.

Meßlücken können allerdings auch durch Blasen hervorgerufen werden, die sich im Laserstrahlengang befinden und das Zustandekommen des Meßvolumens verhindern oder das Streulicht nicht in den Fotosensor einfallen lassen. Diese Meßlücken weisen jedoch nicht den in Bild 7 ersichtlichen typischen Signalverlauf im Vor- und Nachlaufbereich auf.

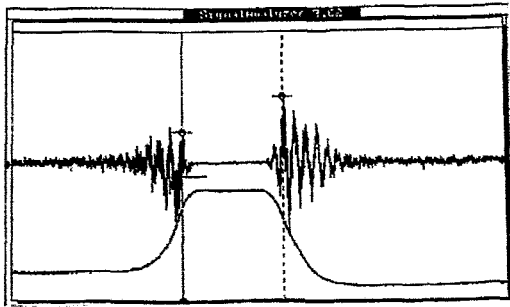


Bild 7: LDA-Burst mit Meßlücke

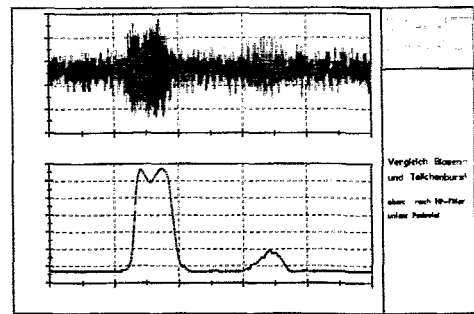


Fig. 8: Häufig auftretendes Meßsignal und Pedestal
Blase - links ; Tracer - rechts

Die Mehrzahl der Blasen signale hat das in Bild 8 gezeigte Aussehen, bei dem der Gleichanteil zwischenzeitlich so wie hier oder noch stärker absinkt.
Das Auffüllen der Meßlücken geschieht in diesen Fällen ggf. durch die an der Blasenoberfläche anhaftenden Tracerteilchen.

3. Anwendung der aus der Blasen signalanalyse gewonnenen Erkenntnisse

Die mit Hilfe des Mikroskops gewonnenen Erkenntnisse eröffnen dem LDA-Anwender eine Reihe vertiefter Untersuchungsmöglichkeiten in Blasenströmungen. Zunächst ist es naheliegend, das größere Pedestal des Blasen signals für die Steuerung einer Trigger- und Torschaltung zu nutzen, um Blasen signale für eine spätere Auswertung markieren zu können. Zum Markieren läßt sich der Encoder-eingang des LDA-Prozessors verwenden.

Die folgenden Meßergebnisse entstanden an einer nach unten gerichteten Wasserströmung in einem parallelwandigen Strömungskanal (Bild 9). Die Luftzugabe erfolgte über eine Kanüle (Variante A). Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit der flüssigen Phase lag bei 1,5 m/s, was einer Reynoldszahl von 7×10^4 entspricht. Der Blasendurchmesser betrug 2 bis 3 mm, die Kanaltiefe 25 mm und die Kanalbreite 276 mm.

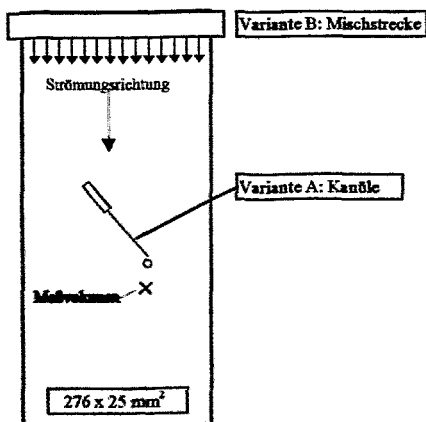


Bild 9: Luftzugabe in abwärtsgerichteter Strömung

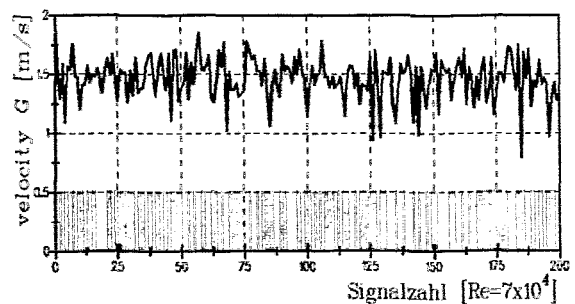


Bild 10: Zeitlicher Verlauf der Gemischgeschwindigkeit und Blasenmarkierungen über Encoderingang

Bild 12 zeigt einige der an den im Blockschaltbild gekennzeichneten Stellen tatsächlich aufgezeichneten Meßsignale.

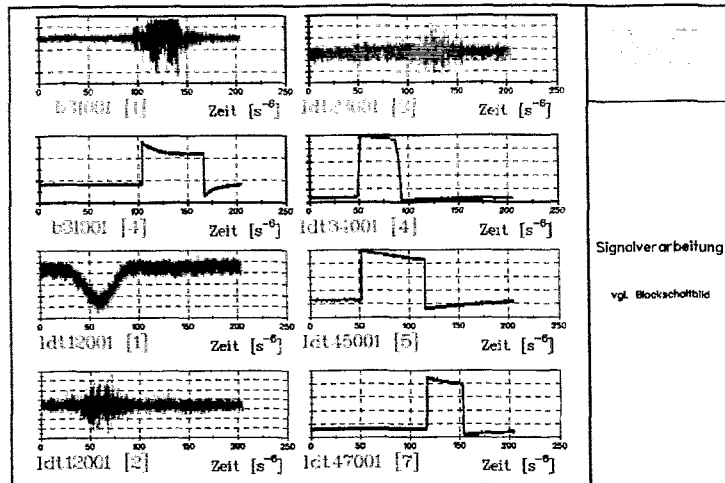


Bild 12: Meßsignalaufzeichnung von den in Bild 11 gekennzeichneten Stellen [eckige Klammer]

Die beiden ersten Bilder in der linken Spalte stammen von einer Blase, die übrigen von einem Tracerteilchen. Zwischen [2] und [3] erfolgte die Verzögerung, [7] gibt die Zeitdauer an, in der das Tor, in diesem Fall für die Messung der Tracergeschwindigkeit, geöffnet ist.

4. Meßergebnisse für beide Einzelphasen und für das Gemisch

In Bild 10 wurde bereits eine kurze Meßreihe von Geschwindigkeitsmessungen vorgestellt. Den Vergleich dieser Ergebnisse mit den Ergebnissen für beide Einzelphasen im gleichen Betriebszustand zeigt Bild 13.

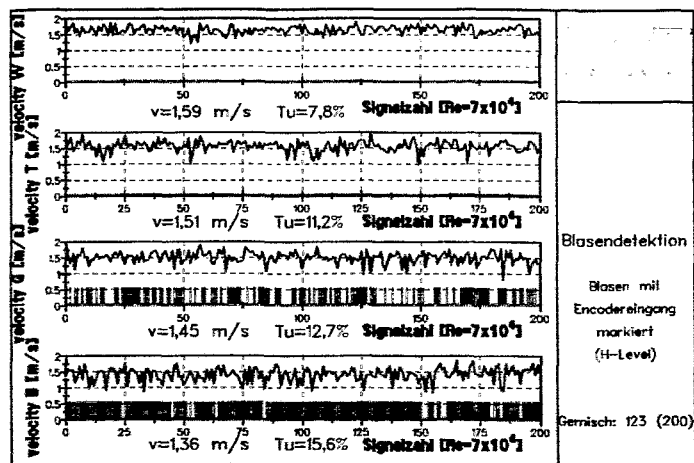


Bild 13: Vergleich der Meßergebnisse für das Gemisch mit denen der beiden Einzelphasen

W - Wasserströmung ohne Luftzufuhr
 T - Tracer in der Gemischströmung
 G - Gemisch (Tracer und Blasen)
 B - Blasen in der Gemischströmung

Die Blasen im Wasser führen zu einem Anwachsen des Turbulenzgrades von 7,8% auf 11,2%. Erwartungsgemäß liegt die mittlere Geschwindigkeit des Gemisches zwischen denen der Flüssigkeit und der Blasen. Zwischen dem Turbulenzgrad der Flüssigkeit und der Blasen besteht ebenfalls ein deutlicher Unterschied, der Turbulenzgrad des Gemisches liegt wiederum dazwischen. Letzteres muß nicht immer der Fall sein, da sich bei großem Schlupf die Geschwindigkeitsunterschiede stark im Turbulenzgrad niederschlagen. Das ist natürlich auch von dem im Meßergebnis repräsentierten Anteil beider Phasen abhängig, weshalb es wichtig ist, die Anzahl der jeweils erfaßten Ereignisse mittels Counter zu bestimmen. Dabei muß in Kauf genommen werden, daß z.B. in der Flüssigkeit agglomerierte Tracer zu einem blasenähnlichen Signal führen können, es also eine Fehlinterpretation geben kann. Daraus wird deutlich, daß dem Tracermedium in gasbeladenen Flüssigkeiten eine besondere Beachtung zu schenken ist.

Um die beschriebene Meßanordnung in einer repräsentativen Anwendung zu testen, wurden Messungen an einer aufwärts durchströmten Düse mit Rechteckquerschnitt entsprechend Bild 14 vorgenommen, wobei ein merklicher Blasenvorlauf zu erwarten war.

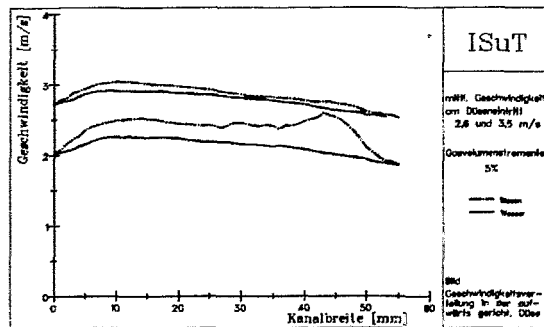
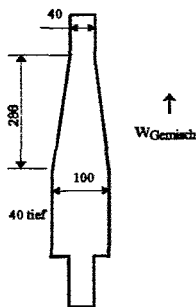


Bild 14: Schematische Darstellung der Meßdüse

Bild 15: Geschwindigkeiten der Einzelphasen in Düsenmitte

Die stärkeren Voreilgeschwindigkeiten der Blasen bei dem kleineren Gesamtvolumenstrom in Bild 15 sind dadurch bedingt, daß wegen der Strömungsvorgänge in der Mischstrecke hier viel größere Blasen vorliegen als bei dem größeren Gesamtvolumenstrom.

Je höher der örtliche Gasvolumenstromanteil ist, desto stärker wird das Meßergebnis durch ihn beeinflusst. Andererseits kann es im Strömungsfeld selbst bei hohen gemittelten (auf den Strömungsquerschnitt bezogenen) Gasvolumenstromanteilen örtlich Bereiche mit niedrigem Gasanteil geben, so daß sich hier die modifizierte Gemischgeschwindigkeit der Geschwindigkeit der flüssigen Phase annähert.

Bild 16 zeigt die Blasendurchgangshäufigkeitsverteilung über der Kanalbreite an dem oben beschriebenen Ort.

Zu beachten ist dabei, daß die Messung der Blasendurchgangshäufigkeit nur tendenziöse Aussagen zur Verteilung des Gasvolumenstromanteils zuläßt, da einerseits Blasen durch ihre vordere und hintere Flanke jeweils zwei LDA-Signale liefern können und andererseits Blasen, die, in Laserstrahlrichtung gesehen, vor dem Meßvolumen den Strahlengang durchqueren, diesen unterbrechen. Durch die Unterbrechung des Meßvorganges werden insbesondere bei hohen Gasvolumenstromanteilen zu wenig Blasendurchgänge registriert, weshalb im Bild 17, das die

Blasendurchgangshäufigkeit in Wandnähe angibt, kaum noch Unterschiede zwischen 15% und 20% Gasvolumenstromanteil festzustellen sind.

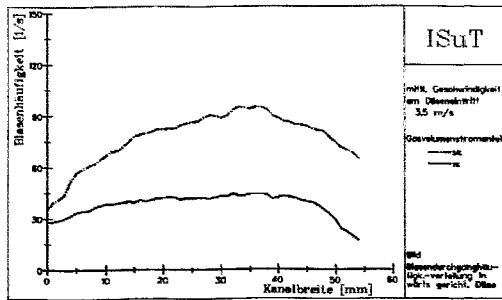


Fig. 16: Blasendurchgangshäufigkeitsverteilung in der aufwärtsgerichteten Düse

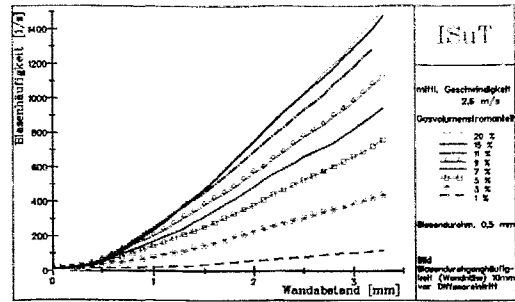


Bild 17: Blasendurchgangshäufigkeitsverteilung in Wandnähe

5. LDA - Messungen mit hoher zeitlicher Auflösung

Bei Vorhandensein eines Phasenschlupfes wird im Vorlauf- und im Nachlaufbereich der Blase je nach Richtungssinn die Flüssigkeit beschleunigt oder verzögert, es kommt zu überlagerten Geschwindigkeitsänderungen, die vom LDA als zusätzliche Turbulenz gedeutet werden. Um diese Pseudoturbulenz als solche erfassen zu können, sind zeitlich hochaufgelöste LDA-Messungen durchzuführen, damit der Geschwindigkeitsverlauf um die Blase beim Meßvolumendurchgang bestimmt werden kann.

Bei hoher Tracerteilchenbeladung und einer Datenrate ab etwa 5 kHz können im zeitlichen Meßablauf nicht nur die Meßlücken durch die Blasen sondern auch die Geschwindigkeitsänderungen vor und hinter einer schlupfbehafteten Blase festgestellt werden. Hierzu wurden zunächst Untersuchungen an Einzelblasen durchgeführt, wobei die Luftzuführung über die beschriebene Kanüle erfolgte. Die Traceranzahl wurde drastisch erhöht. Bei dem in Bild 18 dargestellten Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit treten Meßlücken immer in Bereichen kleiner Geschwindigkeiten auf (abwärtsgerichtete Strömung - negativer Schlupf). Die zugehörige Geschwindigkeit liegt im Durchschnitt bei 1,3 m/s. Daraus und aus der mittleren Dauer einer Meßlücke von 2 ms ergibt sich ein mittlerer Blasendurchmesser von 2,6 mm, der auch tatsächlich beobachtet werden konnte.

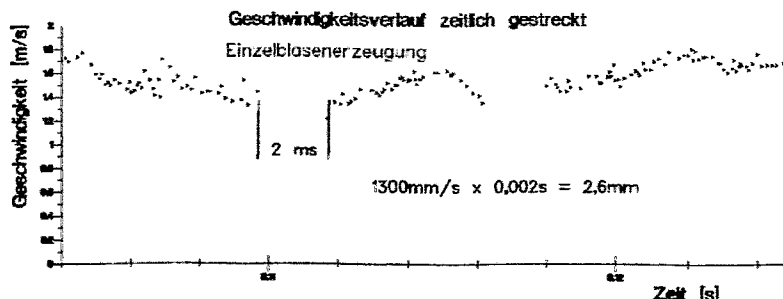


Bild 18: LDA-Geschwindigkeitsmessung bei Einzelblasenerzeugung, Einzelwerte $f(t)$

Nicht so eindeutig gestaltet sich das Meßergebnis, wenn statt der Kanüle, die so angeordnet war, daß die Blasen zwangsläufig das Meßvolumen passieren, eine Misch-

strecke zur Blasenenerzeugung verwendet wird (Variante B in Bild 9). Die Blasen haben in diesem Fall einen Durchmesser von 1-2 mm und der Schlupf ist gering. Hinzu kommt, daß die Mehrzahl der Blasen das Meßvolumen nur streift. So entstehen viele kleine Meßlücken und nur wenige sind so eindeutig, wie die in Bild 19.

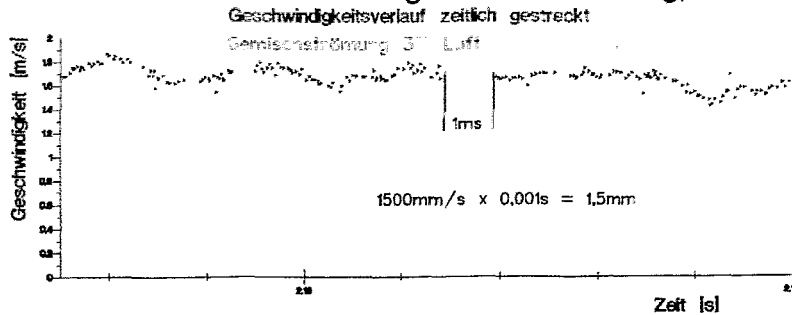


Bild 19: LDA-Geschwindigkeitsmessung bei Gemischströmung, Einzelwerte $f(t)$

6. Blasenvor- und -nachlauf bei ruhendem Wasser

Wegen der vorher beim Gemisch mit kleinen Blasen aufgezeigten Schwierigkeiten wurden Detailuntersuchungen zum Blasenvor- und -nachlauf zunächst im ruhenden Wasser vorgenommen, aber auch bei Blasendurchmessern von etwa 1 bis 1,5 mm. Dazu wurde Luft über die inzwischen nach oben gedrehte Kanüle zugegeben. Jede Blase ergab einen Peak im zeitlichen Signalverlauf entsprechend Bild 20 (wegen der Beibehaltung des Richtungssinnes negativ):

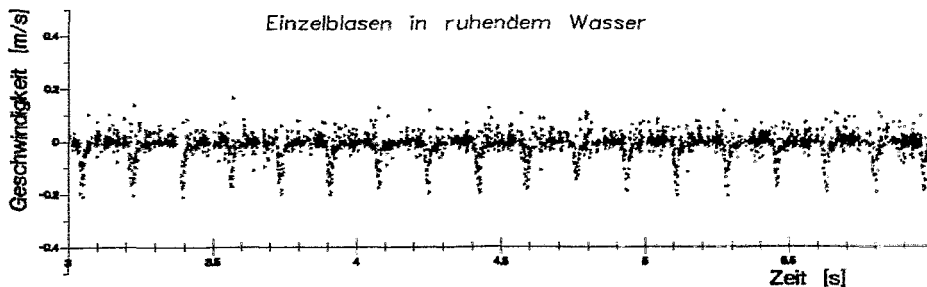


Bild 20: Zeitlicher Signalverlauf bei in ruhendem Wasser aufsteigenden Blasen

Die von den Blasen mitgerissenen Wasseranteile sind hier deutlich zu erkennen. Für weitere Untersuchungen wurde wieder eine zeitliche Streckung des Meßsignals vorgenommen, Bild 21:

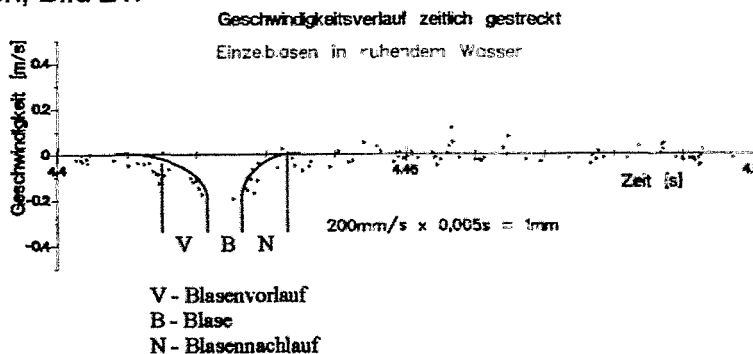


Bild 21: Zeitlicher Signalverlauf bei in ruhendem Wasser aufsteigenden Blasen - zeitlich gestreckt

Die Meßlücke ergibt wieder den Blasendurchmesser, der mit den Beobachtungen übereinstimmt. Die Beeinflussung des Wassers erstreckt sich über einen Bereich, der sowohl im Vor- als auch im Nachlauf etwa dem Blasendurchmesser entspricht.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Durch Untersuchungen mittels Mikroskop konnte geklärt werden, warum Gasblasen LDA-Signale mit größerem Pedestal und größerer Amplitude ergeben. Sowohl die Phasengrenzfläche als auch an der Blasenoberfläche agglomerierte Tracerteilchen erzeugen einen höheren Gleichanteil.

Bei annähernd diametralem Durchgang der Blase durch das Meßvolumen erzeugen zumindest die vordere und die hintere Phasengrenzfläche ein LDA-Signal. Dazwischen liegt eine Meßlücke, die sich für die Blasendurchmesserbestimmung ausnutzen läßt.

Das erhöhte Pedestal und die stärkere Amplitude lassen sich für die Triggerung verwenden, um Blasen- und Tracerteilchensignale zu trennen und zu zählen. Wie die Signalanalyse und die Anwendung in der technischen Apparatur zeigen, ist die vorgestellte Schaltung dafür geeignet.

Die Kenntnis des im Meßergebnis enthaltenen Anteils beider Phasen ist notwendig, um die Beeinflussung des Turbulenzgrades durch die Blasenbeladung definieren zu können. Es wird vorgeschlagen, Meßwertumrechnungen vorzunehmen, die dafür sorgen, daß das Ergebnis unabhängig von der Tracerdosierung ist und den tatsächlichen Gasvolumenstromanteil widerspiegelt.

Bei Datenraten ab ca. 5 kHz sind zeitlich hochaufgelöste Messungen möglich, die ein genaueres Studium der Strömungsvorgänge im Blasen- und -nachlauf gestatten. Schwierigkeiten ergeben sich beim hier eingeschlagenen Weg noch bei kleinen Blasen.

Ziel war es, eine genaue Aussage zu der durch die Blasen hervorgerufenen „Pseudoturbulenz“ zu treffen.

ENTWICKLUNG UND EINSATZ EINES LASER-DOPPELPULSVERFAHRENS ZUR OPTISCHEN UNTERSUCHUNG DER DYNAMIK VON KAVITATIONSERSCHEINUNGEN IN EINER SCHNELL DURCHSTRÖMTEN, PLANAREN DÜSE

Dr.-Ing. P. Roosen (Vortragender), Dipl.-Phys. S. Kluitmann
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik der RWTH Aachen

1. Einleitung

Die hydrodynamisch nichttriviale Durchströmung eines Düsenkanals ist ein physikalischer Prozeß, der nach wie vor nicht vollständig verstanden ist. Bei den bei motorischen Einspritzsystemen in der Regel anzutreffenden Druckgefällen und den damit verbundenen großen Druckgradienten treten Phasenumwandlungsprozesse auf, die die strömende Flüssigkeit zum spontanen Ausdampfen veranlassen.

Kavitation wird üblicherweise nur mit Materialschäden an nahegelegenen Wandungen in Verbindung gebracht. Neben diesem negativen Effekt ist jedoch auch die positive Wirkung der Kavitation zu sehen: sie stellt eine wirksame Methode zur Mischung bzw. Homogenisierung von Substanzen dar. Für eine technische Nutzung des Phänomens Kavitation ist es daher erforderlich, detailliertere Informationen über die Dynamik des Prozesses zu erhalten. Dies erfordert eine eingehende Untersuchung der verschiedenen, am Gesamtprozeß beteiligten Einzelvorgänge.

Technische Düsen besitzen üblicherweise gebohrte, axialsymmetrische Düsenlöcher, in denen die zu betrachtenden Kavitationsprozesse stattfinden. Entsprechend bilden sich auch die Kavitationsgebiete axialsymmetrisch zur Spritzlochachse aus und verhindern hierdurch die Untersuchung des Strömungsinnenbereichs [1, 4]. Auch heute noch gehen einige Arbeitsgruppen mit überdimensionierten Modellen und Ähnlichkeitsbetrachtungen an diese Problemstellungen heran [3], können auf dieser Basis allerdings ausschließlich Kenngrößenuntersuchungen vornehmen. Neuere Entwicklungen lassen zumindest unmittelbar nach Düsenaustritt weitere Einsichten in die Strömungsstruktur des jungen Sprays erwarten [2].

Gerade die Oberfläche zwischen nicht-kavitierender Flüssigkeit und mit Gasblasen durchsetztem Spritzlochvolumen ist jedoch für die Untersuchung der Entstehung der strahlinternen Dynamik von besonderem Interesse. Unter gewisser Einschränkung der Übertragbarkeit von Ergebnissen bietet eine nur in eine Raumrichtung erfolgende Einschnürung der Kanalströmung die Möglichkeit, gerade diese Grenzschicht zwischen Flüssigkeit und Dampf zu studieren. Daher wird von uns eine planare, transparente Düse zur Untersuchung dieser Phänomene eingesetzt (Bild 1), die im wesentlichen aus zwei dicken Quarzglasplatten (3) und (14) besteht, zwischen die eine Stahllamelle eingelegt wird (rechtes Teilbild 1). Sie ermöglicht eine weitestgehend freie Wahl des Abspritzdrucks (1 bar bis ca. 200 bar) des bei (5) durch eine der Glasplatten in die Düse eintretenden Materials. Der Düsenaustritt (16) führt zu einer Gegendruckanlage, die konstante Drücke zwischen 1 bar und 50 bar einzustellen erlaubt.

Die Wahl der abzuspritzenden Flüssigkeiten ist weitgehend frei, da sowohl die Treibgasflasche als auch das Gegendrucksystem mit Inertgasen betrieben werden kann. Wir

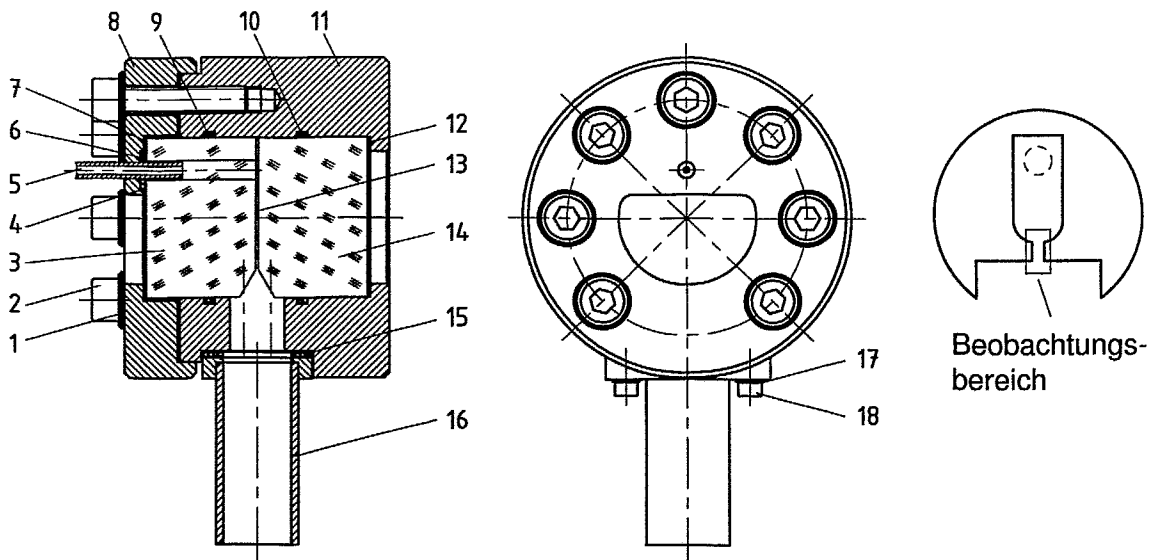


Bild 1: Planare, transparente Düse für Strömungsuntersuchungen. Erklärung siehe Text.

untersuchten insbesondere die Substanzen Decalin, Isopropanol (als Modellschubstoffe für typische Komponenten aus der Siedelinie von Kraftstoffen) und Wasser.

2. Doppelpulsmesstechnik

Die Dynamik der Blasen wird mittels eines speziell adaptierten Laser-Fluoreszenzdoppelpulsverfahrens untersucht, das die extrem kurze Pulsdauer von Puls-lasern (einige zehn Nanosekunden) mit der nicht-interferierenden und somit auch keine Speckle-Muster produzierenden Fluoreszenzstrahlung gelöster Farbstoffe kombiniert. Veränderungen an der Blasenverteilung werden so trotz kleiner Dimensionen der Düse und gleichzeitig hoher Geschwindigkeiten bis in den Mikrometerbereich hinein erfaßbar.

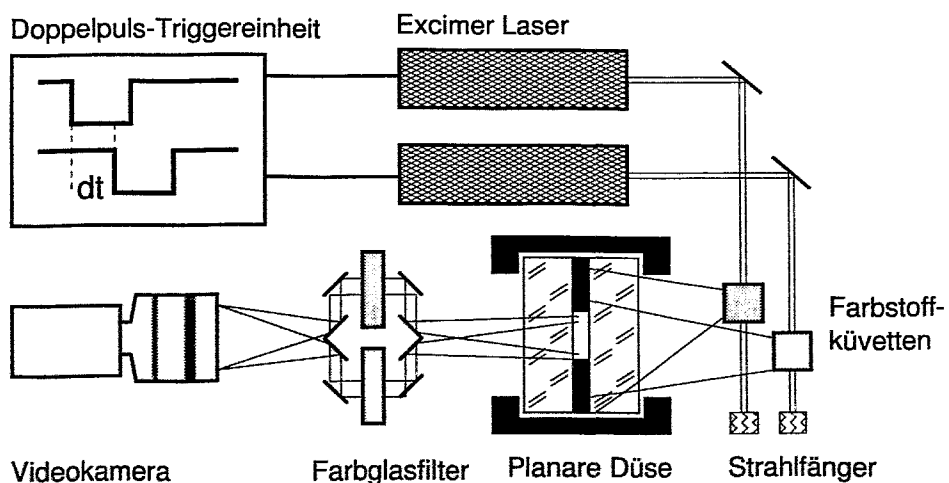


Bild 2: Schematische Darstellung der Doppelpulsaufnahmetechnik

Hierzu wird die Laserstrahlung nicht unmittelbar in das zu beleuchtende Objekt gelenkt, sondern auf Küvetten mit Fluoreszenzmaterialien gerichtet (Bild 2). Deren Licht wird

schließlich zur Beleuchtung des zu untersuchenden Objekts, eines planaren Düsenkanals (siehe auch Bild 1), verwendet. Veränderungen an der Blasenverteilung werden so trotz kleiner Dimensionen der Düse (typisch 1 mm Länge und 0.04 mm² Querschnittsfläche) und gleichzeitig hoher Geschwindigkeiten bis in den Mikrometerbereich hinein erfaßbar.

Die geeignete Auswahl von Fluoreszenzsubstanzen und darauf abgestimmten Farbglasfiltern in den beiden Teilstrahlengängen erlaubt aufnahmeseitig ein sich gegenseitig ausschließendes Filtern zweier praktisch gleichzeitig aufzunehmender Teilbilder. Diese können mit einer Videokamera bei einer im Vergleich zum Doppelpulsintervall langsamen Bildwiederholrate aufgezeichnet bzw. digitalisiert werden. Somit ist es möglich, mit relativ einfachen Mitteln große Datenmengen für statistische Auswertungen zu akquirieren.

Die eingesetzten Excimer-Laser besitzen eine Pulsdauer von ca. 10 bzw. 30 ns. Zu dieser addiert sich die Abklingzeit der Fluoreszenzfarbstoffe, die bei etwa 30 ns liegt. Eine Untersuchung der Gleichheit beider Bildauszüge zeigte erwartungsgemäß, daß bei einem zeitlichen Versatz von weniger als 30 ns keine geometrischen Unterschiede der Kavitationsblasenverteilung in den Teilbildern mehr zu erkennen waren.

Eine ähnliche Anordnung dient der Vermessung des Geschwindigkeitsfeldes im nicht-kavitierenden Bereich der Düsenströmung (Bild 3). Hier wird die Doppelpulstechnik zur Geschwindigkeitsvermessung von Latex-Partikeln mit 10 µm Durchmesser verwendet, die im strömenden Fluid gleicher Dichte schweben. Die geringe Streustärke dieser Partikel machte es erforderlich, die farbtrennende Doppelpulstechnik durch eine Einfarbtechnik zu ersetzen, die eine bessere Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Fluoreszenzlichtes durch ein sehr nahes Heranbringen der Küvette an den Düsenkanal erlaubt. Zugleich entfällt die abschwächende Wirkung der beiden Filterglaskanäle im Auskoppelstrahlengang.

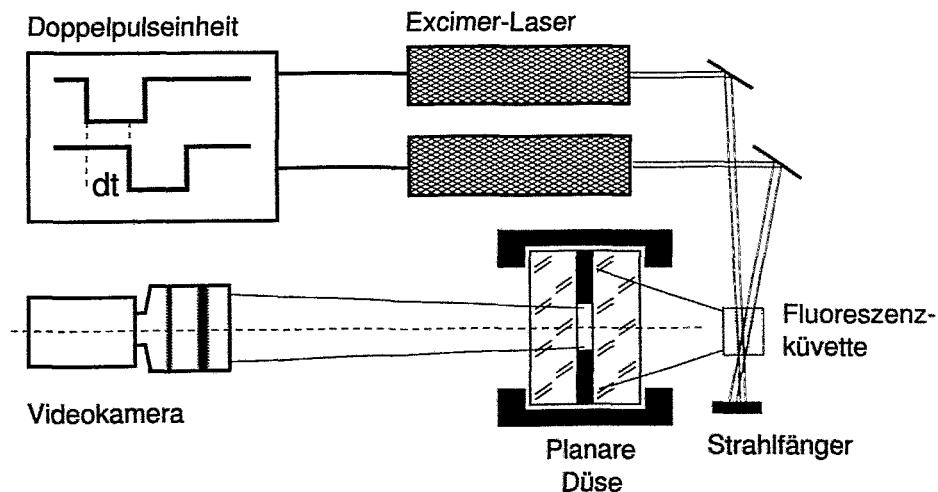


Bild 3: Schematische Darstellung der PIV-Technik

Die Zugabe einer geringen Zahl solcher Partikel ändert die Struktur der auftretenden Kavitation und/oder Gasausfällung nachweislich nicht, da die überaus starken Wand-einflüsse in Form hydrodynamisch induzierter Gradienten des statischen Drucks die wesentlichen Determinanten hierfür sind.

Die Zahl der Schwebepartikel wurde so gering gewählt, daß pro Belichtung nur einige wenige registriert werden konnten. Daher waren die üblichen automatisierten

Korrelationsauswertungen, die eine entsprechende große Zahl von strömungsfeldcharakterisierenden Einzelereignissen pro Bild voraussetzen, nicht anwendbar. Darüber hinaus mußten Schmutzeffekte durch Partikel, die sich an den Glasscheiben abgesetzt hatten, berücksichtigt werden.

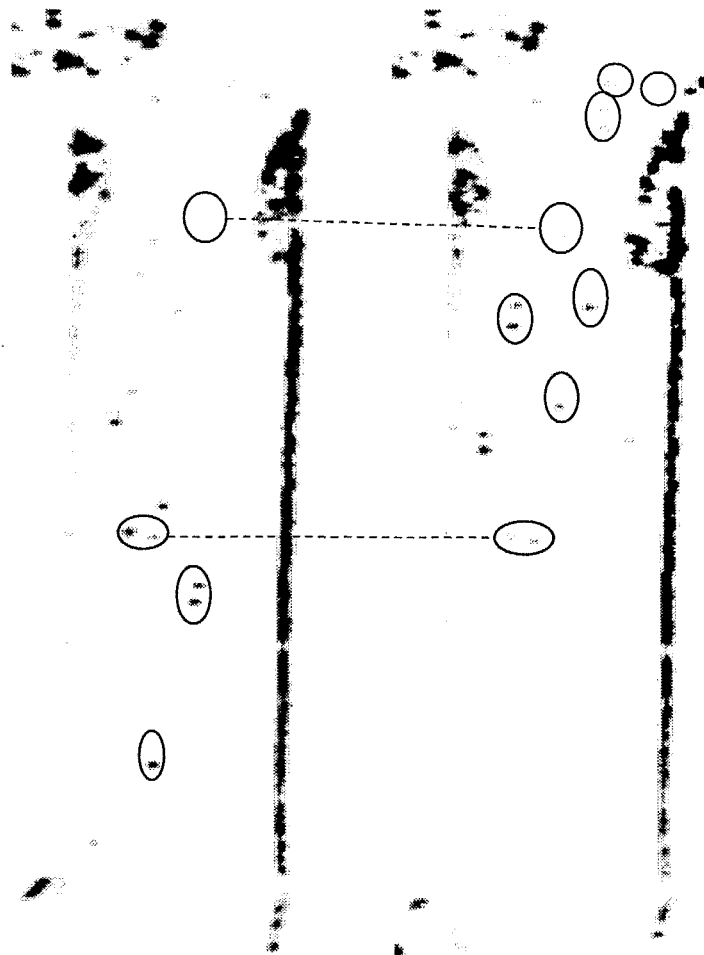


Bild 4: Identifikation von Schmutzeffekten in der PIV-Technik anhand des Vergleichs von Einzelbildern. Strömungsrichtung von oben nach unten. Die Berandung des Düsenkanals ist an den jeweiligen vertikalen Linien zu erkennen.

Bild 4 zeigt ein Beispiel zweier voneinander unabhängiger Doppelbelichtungs-Einzel-aufnahmen aus einer Serie, in denen sowohl „echte“ wie auch falsch interpretierbare „Doppelpulsereignisse“ auftreten. Erst die Korrelation beider Aufnahmen in dem Sinne, daß in diesen statistisch voneinander unabhängigen Einzelbildern Streupartikel an den gleichen Stellen im Bild auftreten, verhindert eine Falschinterpretation: an den Stellen, die in den beiden Bildern miteinander verbunden wurden, treten nahe beieinander liegende Streuteilchen auf, die einen Geschwindigkeitswert in der richtigen Größenordnung ergeben würden, jedoch wegen des gemeinsamen Auftretens in beiden Bildern als Artefakte verworfen werden müssen. Nicht miteinander verbundene Zonen zeigen hingegen „echte“ Doppelbelichtungen.

3. Blasendynamik und Strömungsfeld der Flüssigkeit

In dieser Veröffentlichung sollen nur wenige Beispiele bildhafter Ergebnisse gezeigt werden, die mit Hilfe der beschriebenen Meßtechniken erhalten wurden. Diese wurden teilweise von Hand, teilweise mit Unterstützung der Bildverarbeitungstoolbox Khoros hinsichtlich statistischer Daten ausgewertet. Ausführliche Diskussionen der strömungstechnischen Ergebnisse sind in weiteren Veröffentlichungen ([5] bis [8]) zum Thema zu finden.



Bild 5: Abspritzung mit $p_e = 100$ bar gegen Atmosphärendruck. $T = 295$ K, Fluid: Decalin, von oben nach unten strömend. $\Delta t = 680$ ns. Die zusätzlich eingezeichneten weißen Linien verdeutlichen die Breite des Düsenkanals.

Bild 5 stellt eine typische Abspritzung von Decalin mit Spritzdruck $p_e = 100$ bar gegen atmosphärische Bedingungen. Unmittelbar ist der Detailreichtum der Bilder zu erkennen, wie auch die unter allen bisher untersuchten Bedingungen vorgefundene, generelle Kavitationsverteilung im Spritzloch: ausgehend von den scharfen Einlaufkanten erstreckt sich ein als Schichtkavitation zu beschreibendes Zweiphasengebiet in den Spritzkanal hinein. Zu Beginn noch nicht differenzierbar, zerfällt es stromabwärts in einzelne Zonen, die voneinander durch Zonen klarer Flüssigkeit getrennt sind. In diesem Bereich ist die Dynamik der einzelnen Ligamente im Sinne einer Wachstumsrate und Bewegung in der Kanalebene statistisch nachvollziehbar.

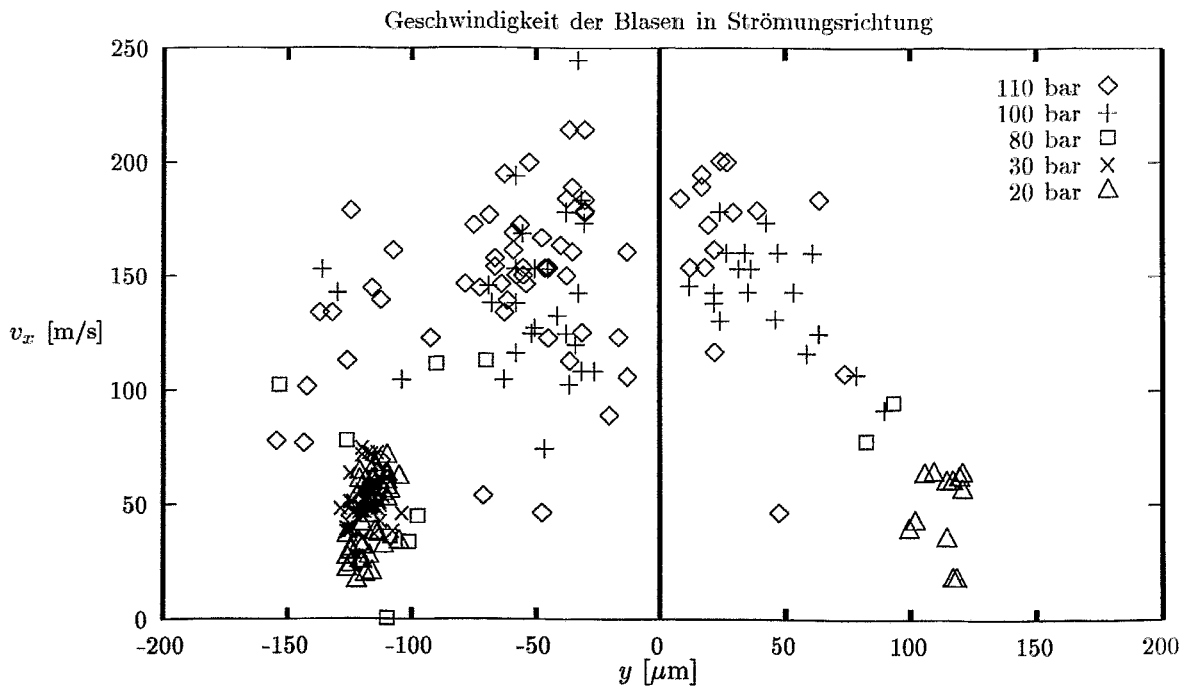


Bild 6: Statistische Auswertung der Blasengeschwindigkeiten in Spritzlochlängsrichtung. Fluid: Decalin

So läßt sich etwa die Geschwindigkeitsverteilung der beobachteten Blasen entlang der Düsenachse in Abhängigkeit der „radialen“ Position im Düsenkanal und des Abspritzdrucks darstellen (Bild 6). Bei höheren Abspritzdrücken werden auswertbare Strukturen auch in der Nähe der Düsenmitte beobachtet, während sich die Kavitationszonen bei den niedrigen Drücken ausschließlich am Kanalrand ausbilden. Bei der Interpretation ist darauf zu achten, daß sich für jeden einzelnen Abspritzdruck eine in der statistischen Streubreite konstante Geschwindigkeit über den vermeßbaren Bereich des Düsenquerschnitts einstellt, während die Geschwindigkeiten vorhersehbar mit steigendem Spritzdruck ansteigen.

Im nicht-kavierenden Bereich der Strömung kann die Geschwindigkeit dagegen mittels der PIV-Technik ermittelt werden. Hier werden zahlreiche Einzelmessungen mit jeweils nur sehr wenigen Latex-Partikeln im Spritzkanal zu einem überlagerten Strömungsbild zusammengefaßt, um eine Visualisierung des Strömungszustandes zu ermöglichen. In Bild 7 ist ein Strömungszustand dargestellt, bei dem durch relativ hohen Gegen- druck die an der Einlaufkante erzeugten Kavitationsblasen bereits im Spritzloch wieder zusammenfallen. Durch die Überlagerung der beteiligten Einzelbilder sind die kavie- renden Bereiche wie auch die Begrenzungen des Düsenkanals als graue Hinterlegung erkennbar. Während in der Einlaufströmung wie auch im Auslauf ein weitestgehend ungestörtes Strömungsfeld in Längsrichtung der Düse vorherrscht, sind am Ort des statistischen Zusammenfallens der Kavitation Querströmungen bzw. Totwassergebiete erkennbar, die eine Turbulenz in der Strömung induzieren. Es darf vermutet werden, daß im Falle des bei motorischen Einspritzdüsen üblichen Zusammenfallens der Kavi- tationsblasen außerhalb der Düse dieses Phänomen wesentlich zum Primärzerfall des Einspritzstrahls beiträgt [1, 4].

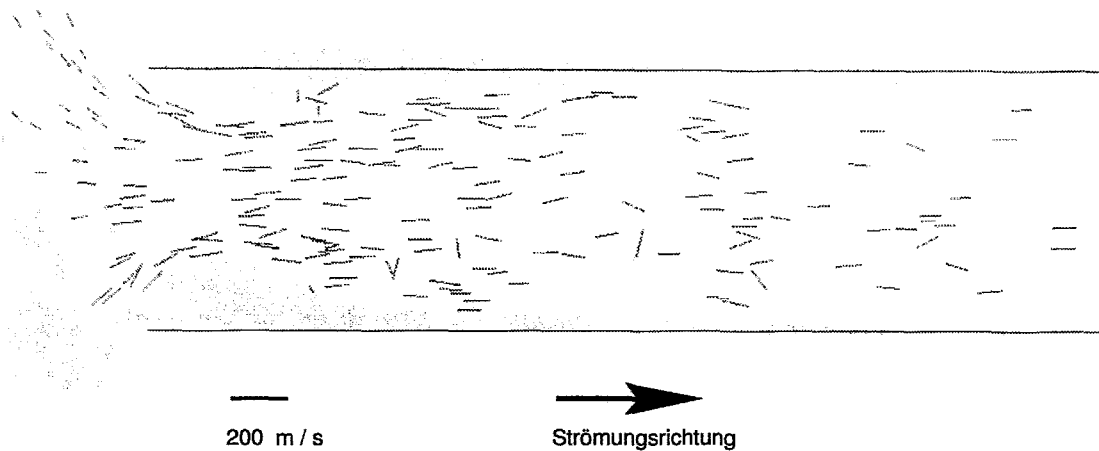


Bild 7: Überlagerung vieler PIV-Einzelaufnahmen mit hervorgehobenen, validierten Einzel-Meßbereichen. Abspritzdruck/Gegendruck = 80 bar/21 bar. Fluid: nichtentgastetes Wasser.

4. Zusammenfassung

Zur detaillierten Untersuchung der Dynamik kavitierender Düsenströmungen in einer planaren, optisch zugänglichen Düse realistischer Dimension wurde eine Doppelpulstechnik entwickelt, die die Kurzzeitigkeit von Laserpulsen mit der Specklefreiheit breitbandiger Strahlung verbindet. Hierbei wird das Licht von Fluoreszenzstrahlern ausgenutzt, die ihrerseits durch Laser zu sehr kurzzeitigem Leuchten angeregt werden. Diese Technik wurde als Lichtquelle für Schattenphotographien wie auch für eine Teilchenspurverfolgung in der planaren Düsen eingesetzt.

An beispielhaften Ergebnissen wurde die Technik erläutert und einige Schlüsse hinsichtlich der Charakterisierung der Düseninnenströmung gezogen.

Die Arbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Transiente Vorgänge“ gefördert.

Literatur

- [1] J. Bode, H. Chaves, A.M. Kubitzek, W. Hentschel, F. Obermeier, K.P. Schindler, T. Schneider: Fuel Spray in Diesel Engines; Proc. 3rd Int. Conf. „Innovation and Reliability in Automotive Design and Testing“, Firenze, 2(1992)749–759
- [2] H. Chaves, F. Obermeier: Transiente Messungen der Geschwindigkeit eines Die-seleinspritzstrahls am Austritt der Düse; 3. Workshop über Sprays, Erfassung von Sprühvorgängen und Techniken der Fluidzerstäubung; DLR, Lampoldshausen, 1997, ISBN 3-89100-029-4
- [3] M. Kato, H. Kano, K. Date, T. Oya, K. Niizuma: Flow Analysis in Nozzle Hole in Consideration of Cavitation; SAE Technical Paper Series 970052

- [4] F. Obermeier: Integrated Development on Enging Assessment with Environment Friendly Fuel Efficient Combustion Technology; European Commission, Joule II Programme, Periodic Report 1995
- [5] P. Roosen, M. Behmann, O. Unruh: Untersuchung der transienten Kavitationerscheinungen in schnell durchströmten Düsen; Abschlußbericht des zweiten Antragszeitraums (1994-95) im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Transiente Vorgänge“
- [6] P. Roosen, M. Behmann, O. Unruh: Optische Untersuchung von Kavitationerscheinungen in einer schnell durchströmten, quasi-zweidimensionalen Düse; 3. Workshop über Sprays, Erfassung von Sprühvorgängen und Techniken der Fluidzerstäubung; DLR, Lampoldshausen, 1997, ISBN 3-89100-029-4
- [7] P. Roosen, S. Kluitmann, K.-F. Knoche: Untersuchung der transienten Kavitationserscheinungen in schnell durchströmten Düsen; Abschlußbericht des ersten Antragszeitraums (1993-94) im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Transiente Vorgänge“
- [8] P. Roosen, O. Unruh, M. Behmann: Investigation of cavitation phenomena inside fuel injector nozzles; ISATA Proceedings on Laser Applications, Florenz, Italien, 1997

MEßTECHNIK ZUR UNTERSUCHUNG TRANSIENTER TRANSPORTPROZESSE IN MEHRPHASENSYSTEMEN: DIE GASZUSAMMENSETZUNG IN UNMITTELBARER NÄHE DER OBERFLÄCHE VON MIKROTROPFEN

H. Moritz und G. Schweiger

*Ruhr-Universität Bochum, Maschinenbau;
Lasieranwendungstechnik und Meßsysteme,
Universitätsstr. 150, 44780 Bochum, Germany
e-mail: moritz@lat2.lat.ruhr-uni-bochum.de
Internet: <http://www.lat.ruhr-uni-bochum.de>*

1 Einleitung

Zur Beschreibung der Absorption und Desorption von Gasen in bzw. aus mikrometergroßen Tropfen ist die Kenntnis der Zusammensetzung der Gasphase in unmittelbarer Nähe der Phasengrenze wichtig. Bisherige Arbeiten [1-3] haben gezeigt, daß die Bestimmung der Konzentration in der Partikelphase optisch und damit berührungsfrei (*in situ*) durch die lineare Ramanspektroskopie durchgeführt werden kann [4]. Neben der Partikelphase wurde gleichzeitig die Gasphase gemessen.

Die Zusammensetzung der Gasphase um die als Tropfenkette vorliegenden Partikel ist senkrecht zur Ausbreitungsrichtung radialsymmetrisch und konnte bereits mit der 2-dimensionalen Raman-Spektroskopie vermessen werden [2]. Entlang des anregenden Laserstrahls erhält man neben der spektralen Auflösung des Streulichts zusätzlich eine Ortsauflösung.

In Ausbreitungsrichtung bewegen sich die Partikel in dem bereits desorbierten Gas der vorher fliegenden Partikel. Mit der stroboskopischen Meßtechnik, die hier vorgestellt wird, ist es nun möglich, die momentane lokale Gaskonzentration zwischen den Tropfen zu messen. Dies wird am Beispiel des Desorptionsprozesses von Acetylen aus Aceton gezeigt. Untersuchungen an der Partikelphase dieses Systems wurden bereits von Moritz et al. veröffentlicht [1-3].

2 Experiment

Die wesentlichen Teile dieses experimentellen Aufbaus wurden bereits ausführlich beschrieben [1-3]. Eine Kette gleich großer Mikrotropfen wird von einem Schwingblendengenerator [5, 6] erzeugt und in eine Atmosphäre mit definierter

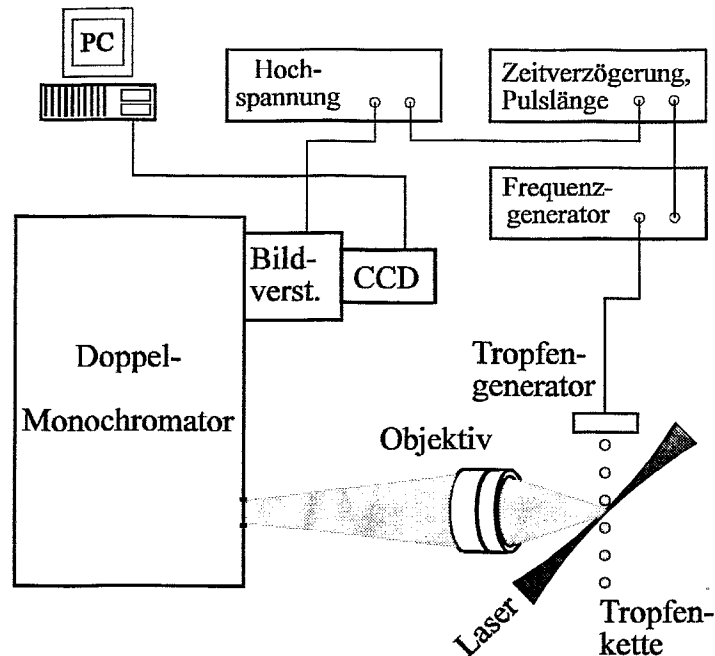


Abb. 1: Skizze des Versuchsaufbaus

Zusammensetzung eingebracht. Mit dem Austritt des Flüssigkeitsstrahls in die Atmosphäre beginnt der zu untersuchende Prozeß: Das vorher in das Aceton eingelöste Acetylen ($c_0 = 0.7 \text{ mol/l}$) beginnt nun aus den Tropfen auszugasen. Der Strahl eines Ar^+ -Lasers (Spectra-Physics, Modell 2030, $\lambda = 514.5 \text{ nm}$) wird auf die Tropfenkette fokussiert und das zur Laserwellenlänge frequenzverschobene Raman-Streulicht auf den Eintrittsspalt eines Doppelmonochromators (Spex 1403) abgebildet. Das elastische Streulicht mit der Wellenlänge der Laserstrahlung wird durch ein holographisches Raman-Filter (Kaiser Optical Systems, HNF-514-1.0) unterdrückt. Eine stickstoffgekühlte CCD-Kamera (Wright Instr. 1) nimmt das Raman-Spektrum auf, das auf einem PC gespeichert und ausgewertet wird.

Eine Skizze des erweiterten Versuchsaufbaus zeigt Abb. 1. Zur stroboskopischen Detektion wurde zwischen den Monochromator und der CCD-Kamera ein Bildverstärker (PCO, Modell IRO) eingebaut. Der Bildverstärker kann in vorher bestimmten Zeitintervallen auf Transmission geschaltet werden. Wird der Bildverstärker mit der Anregungsfrequenz der Tropfenerzeugung getriggert, so werden ganz bestimmte Bereiche der Tropfenkette selektiv gemessen. Durch eine einstellbare Verzögerung kann die relative Lage des Streuvolumens

Abb. 2: Stroboskopische Aufnahme der Tropfenkette.

zum Tropfen genau eingestellt werden. Auf diese Weise kann die Gaskonzentration zwischen den Tropfen auch in Tropfenbewegungsrichtung orts aufgelöst gemessen werden. Eine Bestimmung der Gasphasenkonzentration in der unmittelbaren Nähe zur Tropfenkette ist damit möglich, auch wenn die Tropfenkette örtlich leicht instabil ist.

Die Schaltung des Bildverstärkers erfolgt mit einem Hochspannungspulser (PCO, HVP2N) und einer Zeitverzögerung (PCO, DiDEC), an der auch das Zeitfenster eingestellt wird. Das Zeitverzögerungsgerät sowie der Tropfengenerator werden von einem hochgenauen Frequenzgenerator (HP 3325 B) angesteuert.

Abb. 2 zeigt eine Aufnahme der Tropfenkette an der Position, an der sie auch spektral untersucht wird. Die Tropfenkette wird durch eine LED beleuchtet, die mit der Frequenz der Tropfenerzeugung getaktet wird. Ein Mikroskop bildet die Tropfen auf eine CCD-Kamera (Eyepiece, L.O.T.-Oriol) ab, die von einem PC ausgelesen wird.

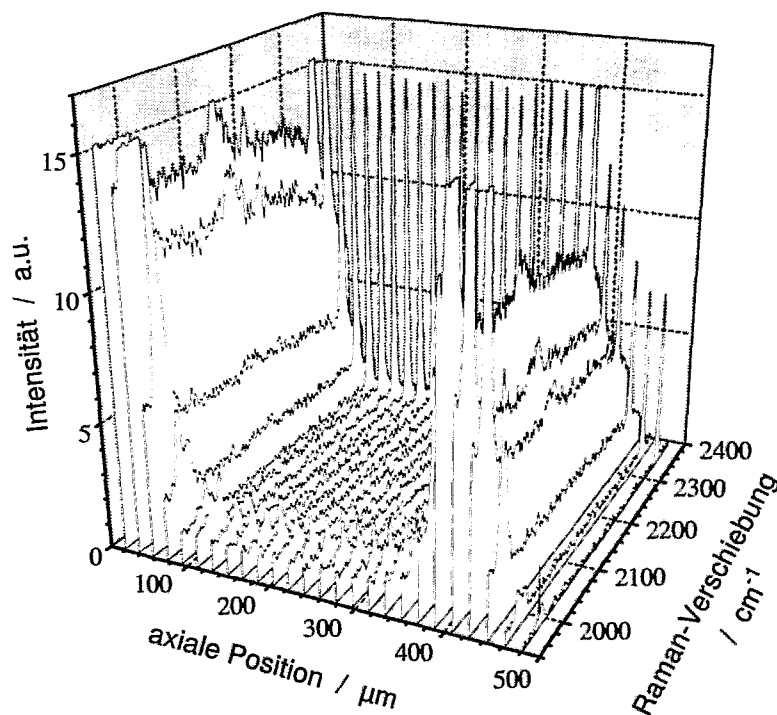


Abb. 3: Raman-Spektren von der Aceton / Acetylen - Tropfenkette an verschiedenen axialen Positionen. Spektren mit einer hohen Signalstärke zeigen die Anwesenheit eines Tropfens im Meßvolumen. Zwischen den Tropfen ist nur das Acetylsignal in der Gasphase (bei 1973 cm^{-1}) sichtbar. Bei 2331 cm^{-1} liegt die Linie des Luftstickstoffs.

3 Ergebnisse

Für die oben beschriebenen Meßmethode wurden die Linien des Acetylens (1973 cm^{-1}) und des Luftstickstoffs (2331 cm^{-1}) beobachtet. Folgende typische Daten wurden eingestellt: Laserleistung 5 W, Laserfokus $\approx 30\text{ }\mu\text{m}$, Frequenz 43,9 kHz, Tropfendurchmesser $62\text{ }\mu\text{m}$, Abstand zwischen den Tropfen $\approx 362\text{ }\mu\text{m}$, Tropfengeschwindigkeit $\approx 10\text{ m/s}$, Monochromatorspalt $600\text{ }\mu\text{m}$, Zeitfenster 500 ns, Gesamtbelichtungszeit 10 s. Die Zeitverzögerungen wurden so gewählt, daß Messungen mit einer axialen Ortsverschiebung von $24\text{ }\mu\text{m}$ erreicht wurden. Durch den Laserfokusbereich von $\approx 30\text{ }\mu\text{m}$ und die Geschwindigkeit der Tropfen erhält man eine axiale Ortsauflösung von $\approx 40\text{ }\mu\text{m}$. Die so erhaltenen Spektren sind in Abb. 3 dargestellt. Man erkennt, daß bei einer axialen Position zwischen 100 und $350\text{ }\mu\text{m}$ das Flüssigphasensignal des Acetylens fast vollständig verschwunden ist. Bei diesen Positionen tritt das Gasphasensignal des Acetylens deutlich hervor, da es nicht vom wesentlich stärkeren Flüssigphasensignal (Acetylen(fl): 1961 cm^{-1} , Untergrund: Aceton) überdeckt wird. Die Stickstofflinie der Luft dient als Referenzlinie, so daß aus den Spektren direkt die Konzentrationsverteilung des Acetylengases zwischen den Tropfen bestimmt werden kann.

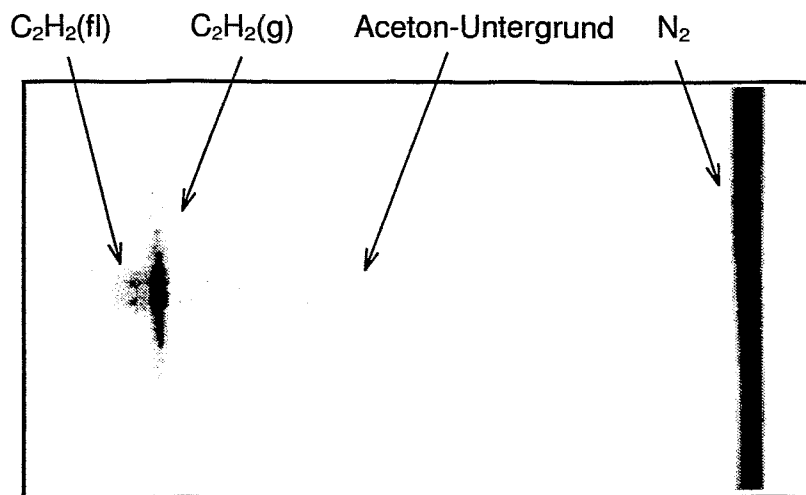


Abb. 4: Logarithmische, invertierte Graustufendarstellung der Intensitätsverteilung auf dem CCD-Detektor. Horizontal erhält man eine spektrale Auflösung und vertikal die räumliche Auflösung senkrecht zur Tropfenkette (bzw. entlang des Laserstrahls).

Um auch die Konzentrationsverteilung des Acetylgases senkrecht zur Tropfenkette bestimmen zu können, wurde die CCD-Kamera insgesamt ausgelesen. Dazu wurde das Zeitfenster auf $1 \mu\text{s}$ und die Gesamtbelichtungszeit auf 120 s verlängert. Abb. 4 zeigt eine Graustufendarstellung der Intensitätsverteilung auf dem CCD-Chip für eine axiale Position zwischen den Tropfen. Zur Auswertung dieser zweidimensionalen Darstellung wurde das Bild in seine horizontalen Linien aufgespalten. Jede Linie entspricht einem Spektrum in einem bestimmten Abstand senkrecht zur Tropfenkette mit einer örtlichen Ausdehnung von $5,3 \mu\text{m}$. Die örtliche Auflösung senkrecht zur Tropfenkette ist $\approx 37 \mu\text{m}$. Jedem dieser Spektren wurden nun mittels eines linearen Fits die Reinstoffspektren der Einzelkomponenten (Acetylen(g), Acetylen(fl), Aceton,

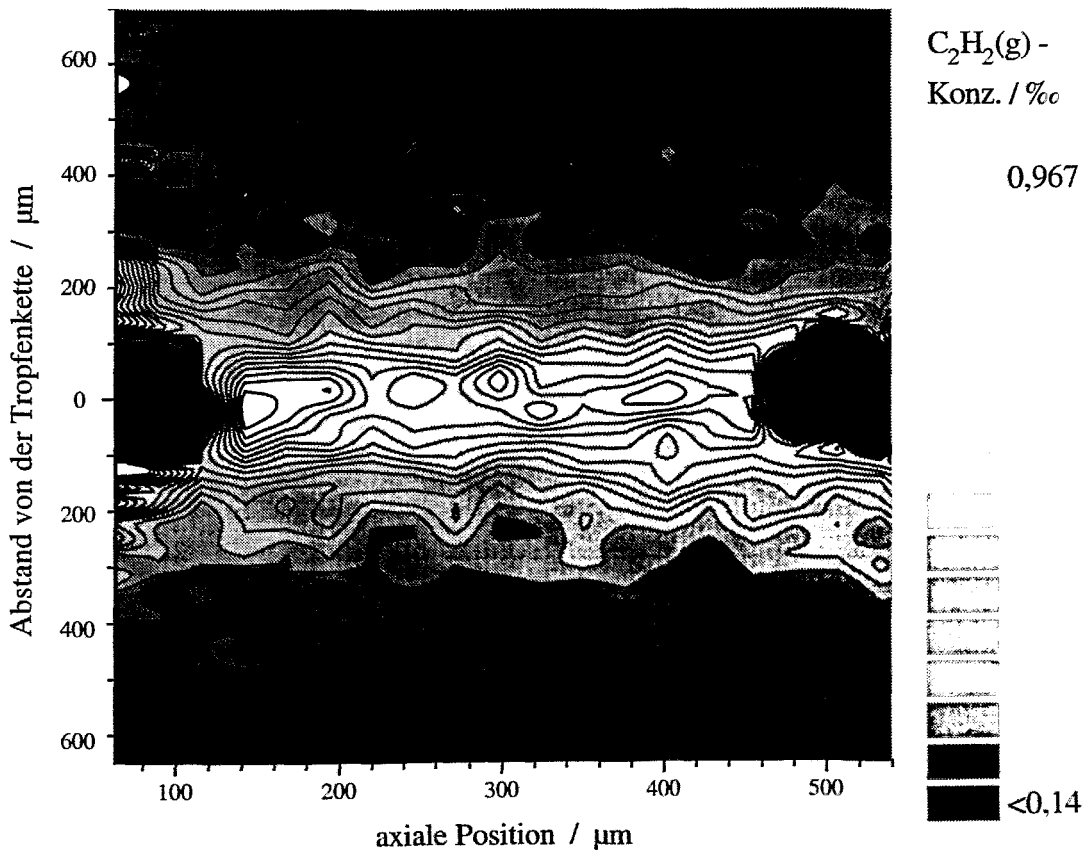


Abb. 5: Zweidimensionale Graustufendarstellung der Konzentrationsverteilung des freigesetzten, gasförmigen Acetylens zwischen den Tropfen einer Aceton/Acetylen-Tropfenkette. Die Tropfen bewegen sich in dieser Darstellung von rechts nach links. Die Einstrahlung durch den Laser geschieht von unten nach oben. Bei der axialen Position $160 \mu\text{m}$ ist ein „Schweif“ erhöhter Acetylenkonzentration des voraus fliegenden Tropfens gut zu erkennen.

Stickstoff) und eine Gerade angepaßt. Damit erhält man relative Konzentrationen für jede Spezies in Abhängigkeit zum Tropfenkettenabstand. Durch Normieren des Acetylenassignals auf das Stickstoffsignal erhält man die absolute Acetylenkonzentration in der Gasphase. Dies wurde für 23 axiale Positionen in äquidistanten Abständen von $\approx 20 \mu\text{m}$ wiederholt. Man erhält so eine zweidimensionale Konzentrationsverteilung des freigesetzten, gasförmigen Acetylen. Dies ist in Abb. 5 in einer Graustufenskalierung dargestellt. Liegt senkrecht zur Tropfenkette Rotationssymmetrie vor, so ist damit die Gasverteilung im Raum bestimmt. Die Flugrichtung der Tropfen in Abb. 5 (Tropfenpositionen: (0, 100) und (0, 500)) ist von rechts nach links. Hinter dem vorausfliegenden Tropfen (links) erkennt man einen „Schweif“ erhöhter Acetylenkonzentration. Die Einstrahlung des anregenden Lasers ist von unten nach oben. Die scheinbaren höheren Acetylenkonzentration links oben in Abb. 5 stammen von der Deformation des Laserstrahls durch die Tropfen.

Die lineare zweidimensionale gepulste Raman-Spektroskopie liefert neben der Gaszusammensetzung auch Informationen über die Flüssigphase. Diese wurden bei dem oben beschriebenen Auswerteverfahren zur Kontrolle genutzt, da die Flüssigphasensignale nur an der Position der Tropfen auftreten dürfen. Abb. 6 zeigt die Ramansignale des noch gelösten Acetylen und des Acetons.

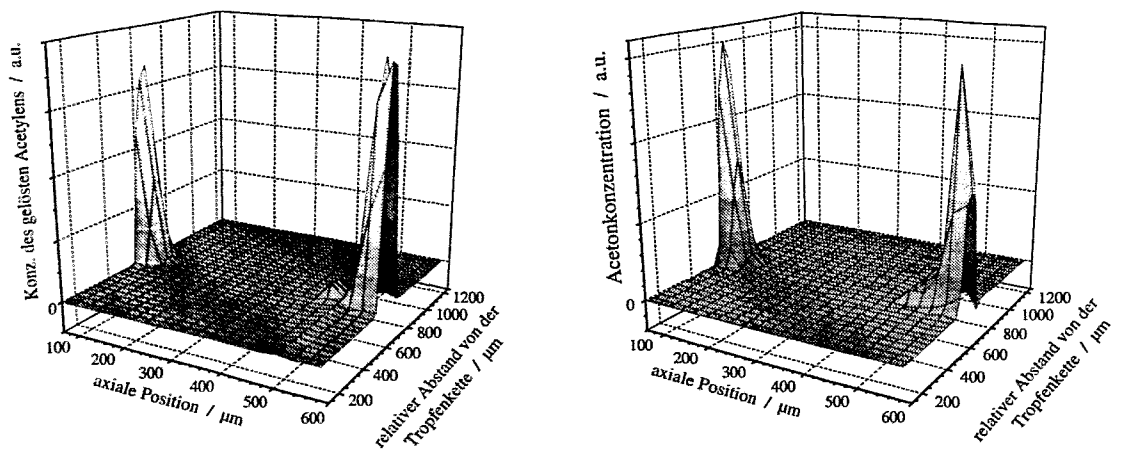


Abb. 6: Die Flüssigphasensignale des noch gelösten Acetylen (links) und des Acetons (rechts) der Tropfen.

4 Zusammenfassung

Am Beispiel des Systems Aceton / Acetylen konnte gezeigt werden, daß eine Messung der momentanen lokalen Gaskonzentration zwischen den Tropfen einer Tropfenkette möglich ist. Es wurde die zweidimensionale Konzentrationsverteilung des freigesetzten gasförmigen Acetylens zwischen den Tropfen bestimmt. Gleichzeitig wurden auch die Komponenten der Partikelphase (Aceton und gelöstes Acetylen) getrennt voneinander gemessen.

5 Ausblick

Es sollen noch weitere Messungen am selben System mit verschiedenen Tropfenabständen und Tropfendurchmessern folgen.

Desweiteren soll eine Lichtschranke aufgebaut werden, die dann die Triggerpulse für den Bildverstärker liefert. Messungen an der Tropfenkette bei einem größeren Abstand zum Tropfenkettengenerator sind dann möglich. Denkbar wäre damit auch die Messung der Gasphase hinter den Tropfen eines monodispersen Sprays.

Die hier gezeigten Messungen sollen noch mit Verdunstungsmodellen verglichen werden.

6 Literatur

- [1] H. Moritz, R. Vehring und G. Schweiger
„Untersuchung schneller Stoff- und Wärmetransportprozesse an Mikrotropfen mittels der linearen Raman-Spektroskopie“
vorgetragen auf der Spray '96 (2. Workshop) (1996).
- [2] R. Vehring, H. Moritz, D. Niekamp, P. Heinrich and G. Schweiger,
„Linear Raman spectroscopy on droplet chains: A new experimental method for the analysis of fast transport processes and reactions on microparticles“
Appl. Spectrosc. **49** (1995) 1215-1224
- [3] H. Moritz, R. Vehring and G. Schweiger
„Investigation of the desorption of Acetylene from Acetone microdroplets by Raman spectroscopy“
J. Aerosol Sci. **27** (1996) S517-518

- [4] G. Schweiger
„Raman scattering on single aerosol particles and on flowing aerosols:
A review“
J. Aerosol Sci. **21** (1990) 483-509
- [5] R. N. Berglund and B. Y. H. Liu
„Generation of monodisperse aerosol standards“
Environ. Sci. Technol. **7** (1973) 147-153
- [6] H.-B. Lin, J. D. Eversole and A. J. Campillo
„Vibrating orifice generator for precision optical studies“
Rev. Sci. Instrum. **61** (1990) 1018-1023

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung. Die Autoren sind für den wissenschaftlichen Inhalt dieses Beitrags verantwortlich.

Transiente Strömungsvorgänge in Rohrleitungen

Visualisierung und Berechnung von Kavitation in Rohrleitungssystemen hinter schnellschließenden Regelklappen

Dipl.-Ing. A. Dudlik, Dr.-Ing. S. Schlüter

Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik e.V. (UMSICHT), Oberhausen

Dr. H.-M. Prasser

Forschungszentrum Rossendorf, Rossendorf bei Dresden

Das in diesem Beitrag vorgestellte Vorhaben wird vom BMBF unter dem Kennzeichen 01ZF9505/4 gefördert. Projektpartner sind das Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik e.V. (UMSICHT), Oberhausen, und das Institut für Sicherheitsforschung im Forschungszentrum Rossendorf e.V. (FZR), Rossendorf bei Dresden.

1. Einleitung

Hervorgerufen durch plötzliche Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit treten in Rohrleitungssystemen Druckwellen („Druckstöße“) auf, die wesentlich höher sein können als die im stationären Betrieb vorliegenden Fluiddrücke. Diese sich mit hoher Geschwindigkeit von etwa 900-1500 m/s längs der Rohrleitung ausbreitenden Druckwellen entstehen hauptsächlich durch schnell ausgeführte Regelungs- und Stell-eingriffe oder durch Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebs [1-6]:

- Anfahren, Abschalten und Ausfall von Pumpen/Kompressoren,
- Öffnungs- und Schließvorgänge an Armaturen,
- schnelle Druckentlastung von Behältern,
- Rohrleitungsbruch bzw. Flanschabriß.

Im Rahmen eines BMBF-geförderten Vorhabens werden experimentelle Untersuchungen an zwei ca. 225 m langen, mit Hoch- und Tiefpunkten ausgestatteten Rohrleitungsschleifen der Nennweiten DN50 und DN100 durchgeführt. Die untersuchten Strömungsgeschwindigkeiten betragen 0,5 bis 5,0 m/s, wobei unterschiedliche Versuchsfluide zum Einsatz kommen. Während der Versuche werden Druckspitzen bis 80 bar, Dampfanteile und lokale Kraftspitzen bis zu 80 kN in hoher zeitlicher Auflösung vermessen. Das Versuchsprogramm umfaßt:

- Vermessung von Kavitationserscheinungen („Kavitationsschläge“) beim Öffnen und Schließen von Stell-, Regel- und Sicherheitsarmaturen,
- Einströmen kompressibler und inkompressibler Medien in leere und teilgefüllte Rohrleitungen bei unterschiedlichen Antriebsdrücken bis 40 bar,

- Ermittlung dynamischer Lagerlasten beim Auftreten von Druckstößen, Kavitationsschlägen und oszillierenden Strömungen (Gas/Flüssigkeitspfropfen).

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen werden mit am Markt erhältlichen Programmen zur Simulation transienter Strömungsvorgänge in Rohrleitungssystemen verglichen (FLOWMASTER, SIR-3S, FLUSTRIN, WANDA, PIPENET, INROS, MONA). In Zusammenarbeit mit Softwareentwicklern, Rohrleitungsplanern, Armaturen- und Pumpenherstellern und Anlagenbetreibern werden Aussagen zur Genauigkeit der einzelnen Programme und der hierfür erforderlichen Modelltiefe getroffen. Insbesondere werden die Aussagegenauigkeit der implementierten Kavitationsmodelle und die Notwendigkeit einer Berücksichtigung von Fluid-Struktur-Wechselwirkungen für die Planung und den Betrieb verfahrenstechnischer Anlagen geprüft.

2. Theoretische Arbeiten

In Tabelle 1 sind die bei UMSICHT installierten Programme zur Berechnung stationärer und instationärer Strömungen in Rohrleitungen vergleichend aufgeführt. Mit Ausnahme des Rechencodes FLUSTRIN werden Strömungszustände eindimensional (in axialer Richtung) berechnet. Diese Methode ist vor allem bei verzweigten Systemen aufgrund der weitaus längeren Rechenzeit bei mehrdimensionaler Betrachtung vorzuziehen.

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

WANDA, FLOWMASTER, PIPENET und SIR-3S sind Rechencodes vergleichbarer Modelltiefe. Die Berechnungsgrundlage der Programme ist das Charakteristikenverfahren, wobei FLOWMASTER und SIR-3S Routinen zur Berücksichtigung kleiner Anteile disperser Gasvolumina in einer Flüssigkeitsströmung implementiert haben. Mit beiden Codes ist es darüberhinaus möglich, kompressible *Gasströmungen* in Rohrleitungen zu berechnen.

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

Name	WANDA	FLUSTRIN	FLOWMASTER	PIPENET	SIR-3S	MONA
Version	1.08 - Juni '97	2.12 - Jan. '97	4.5 - Jan. '97	3.5 - Feb. '97	4.5 - Jan. '97	2.0 - Juni '97
System	MSDOS 5.0-DBOS/486	MSDOS 5.0-DBOS/486	Solaris	Windows 3.1	Windows 3.1	Solaris
Hersteller	delft hydraulics (NL)	delft hydraulics (NL)	FLOWMASTER (UK)	SUNRISE (UK)	3S-Consult (D)	Scandpower (N)
Rechenmodus	2-GL-Modell	5-GL - Modell	2-GL - Modell	2-GL - Modell	2-GL - Modell	7-GL - Modell
	Charakteristikenverfahren	Charakteristikenkv., FEM	Charakteristikenverfahren	Charakteristikenverfahren	Charakteristikenkv., FDM	FDM
Geometrie	1-dimensional	1/3-dim	1-dimensional	1-dimensional	1-dimensional	1-dimensional
	verzweigt	unverzweigt	verzweigt	verzweigt	verzweigt	unverzweigt
Medien	fl	fl	fl, g	fl	fl	fl, g, Tröpfchen
	einphasig	einphasig	einphasig	einphasig	einphasig	dreiphasig
	Dampfkavitation	-	Dampf- und Gaskavitation	Dampfkavitation	Dampfkavitation	3-Phasenmodell
Besonderheiten	-	Fluid-Struktur-Wechselwirkungen	Einströmen Wärmeübergang	Einströmen Kräfte	mehrere Flüssigkeiten Kräfte	Wärmetransport Einströmen Flow Regime

Tabelle 1: Installierte Software zur Dimensionierung von RL-Systemen

3. Experimentelle Arbeiten an der UMSICHT-Versuchsanlage

Die Druckstoß-Anlage besteht im wesentlichen aus zwei parallel verlegten Rohrleitungen der Nennweiten DN50 und DN100 (s. Abb.1). Wesentliche charakteristische Anlagendaten sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Leitungen sind in unterschiedlichen Längen von 0,5 m bis 12 m geflanscht, um spezielle Geometrien (z. B. Bypass der Rohrbrücke, Tiefpunkte) einfach nachzustellen und Glasrohre zur Visualisierung der Strömungsformen einsetzen zu können. Die Verschaltung der Anlagenteile Druckbehälter, Auffangbehälter, Durchlauferhitzer, Kompressor und Kreiselpumpen ermöglichen unterschiedliche Betriebsweisen:

- Umlaufbetrieb bei Umgebungs- und erhöhter Temperatur bis 90 °C,
- Umlaufbetrieb unter Vordruck bis zu 40 bar,
- Entlastungs- und Einströmvorgänge bis zu einem Vordruck von 40 bar.

Meßleitungen		
Gesamtlänge	225 m	
Länge ohne Rohrbrücke	200 m	
Durchmesser DN50 / DN100	60 x 3 mm; 114 x 3 mm	
Material	Edelstahl 1.4571	
p_{\max} , 20 °C	DN50:	141 bar
	DN100:	79 bar
p_{\max} , 100 °C	DN50:	117 bar
	DN100:	65 bar
Behälter		
Behälter 1	2,0 m ³	40 bar
Behälter 2	3,0 m ³	atm
Rohrbrücke		
Höhe x Länge	10 m x 6 m	
Pumpen		
Kreiselpumpe 1	50 m ³ /h;	140 m
Kreiselpumpe 2	185 m ³ /h;	55 m
Durchlauferhitzer		
Durchlauferhitzer	50 kW	95 °C

Tabelle 2: Charakteristische Anlagendaten

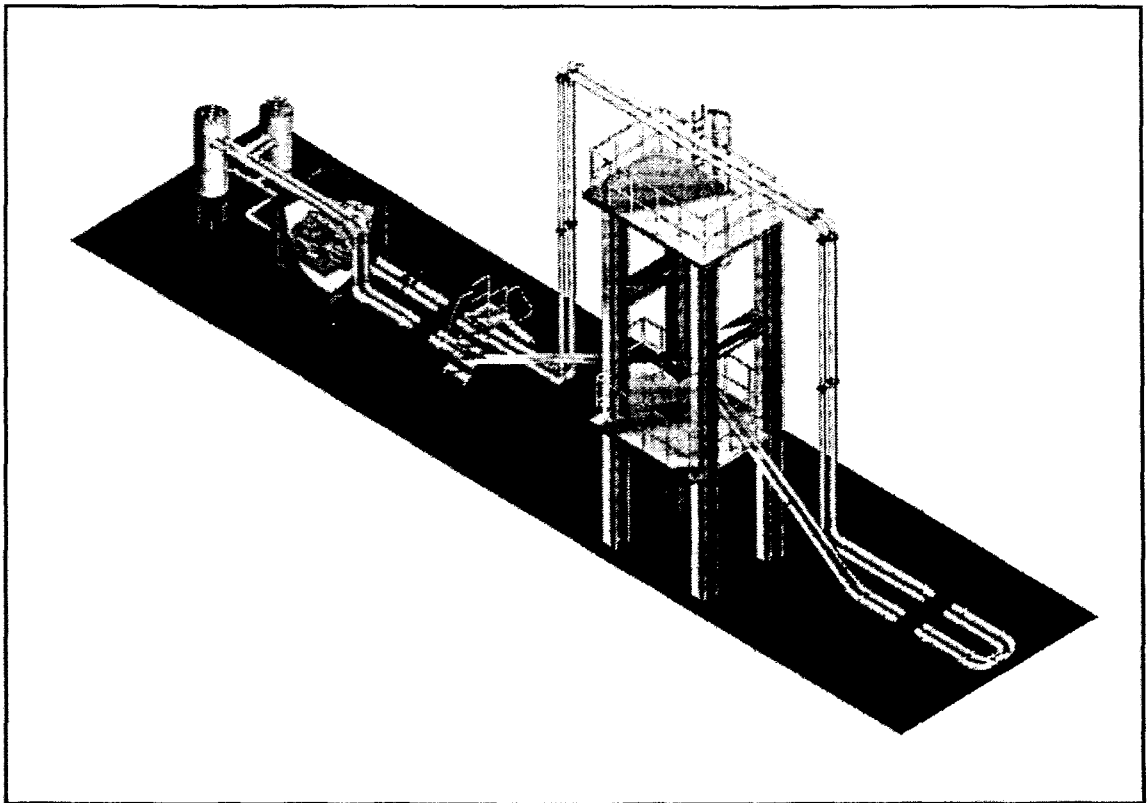


Abb 1: Perspektivische Ansicht der Versuchsanlage

An der Versuchsanlage wird die in Tabelle 3 spezifizierte Meßtechnik zur Vermessung transienter Strömungen eingesetzt.

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

Das Meßprinzip der dreiachsigen *Kraftaufnehmer* beruht auf Dehnungsmeßstreifen. Die Aufnehmer können an mehreren Positionen in der Anlage als Festpunkt eingebaut werden.

Die vom Projektpartner FZR entwickelten *Leitfähigkeits-Gittersensoren* dienen der Untersuchung des Gas- oder Dampfanteils einer Strömung über dem Rohrquerschnitt. Mit Hilfe einer tomographischen Auswertemethode ist die Möglichkeit gegeben, die zweidimensionale Verteilung der Phasen in einer Gas-Flüssigkeitsströmung zu messen [7].

Für die Aufnahmen mit der KODAK-Hochgeschwindigkeitskamera (Funktionsweise in [9]) wurde ein 2 m langes edelstahlummanteltes Quarzglasrohr in die Versuchsanlage eingebaut (s. Abb. 4). Der Innendurchmesser des Glasrohrs entspricht mit 108 mm dem der Meßleitung DN100. Die vier Sichtfenster sind jeweils 30 cm lang und ermöglichen den Blick durch den gesamten Leitungsquerschnitt. Mit dieser

Anordnung können Kavitationsvorgänge bis zu Druckspitzen von 30 bar visuell beobachtet werden.

Druckmessung	
piezoresistive Miniaturdruckaufnehmer incl. Temperatúrausgang (Kulite)	10 St.
Meßfrequenz	10 kHz
Meßbereich	0-75 bar
Kraftmessung	
dreiachsige Kraftsensoren (Rieger)	2 St.
Meßbereich	±80 kN
Gas-, Dampf- und Flüssigkeitsanteile (Projektpartner FZR Rossendorf)	
Drahtgittertomographen	4 St.
Meßfrequenz	1 kHz
nadelförmige Leitfähigkeitssonden	16 St.
Meßfrequenz	10 kHz
Ultraschallsensoren	3 St.
Strömungsvisualisierung	
Highspeed-Kamera (Kodak)	1 St.
Bildfrequenz	1-9 kHz

Tabelle 3: Transiente Meßtechnik

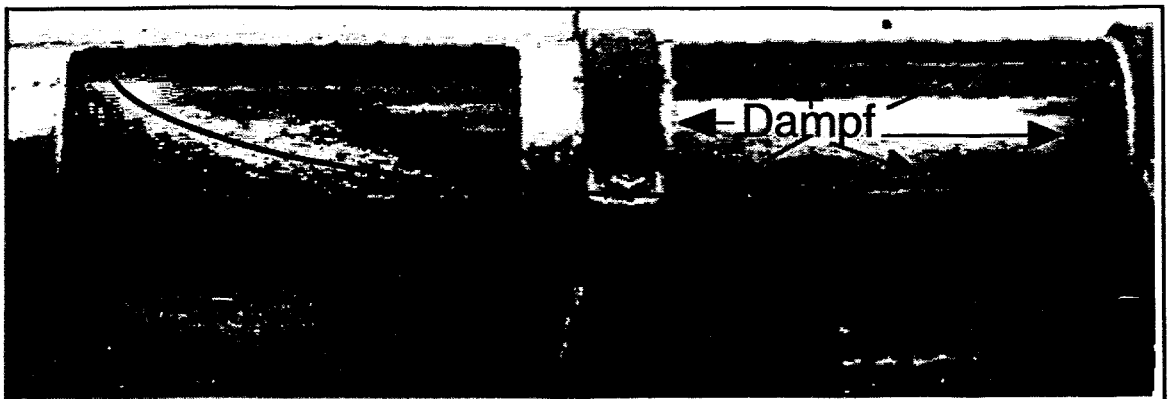


Abb. 4: Position der Highspeed-Kamera

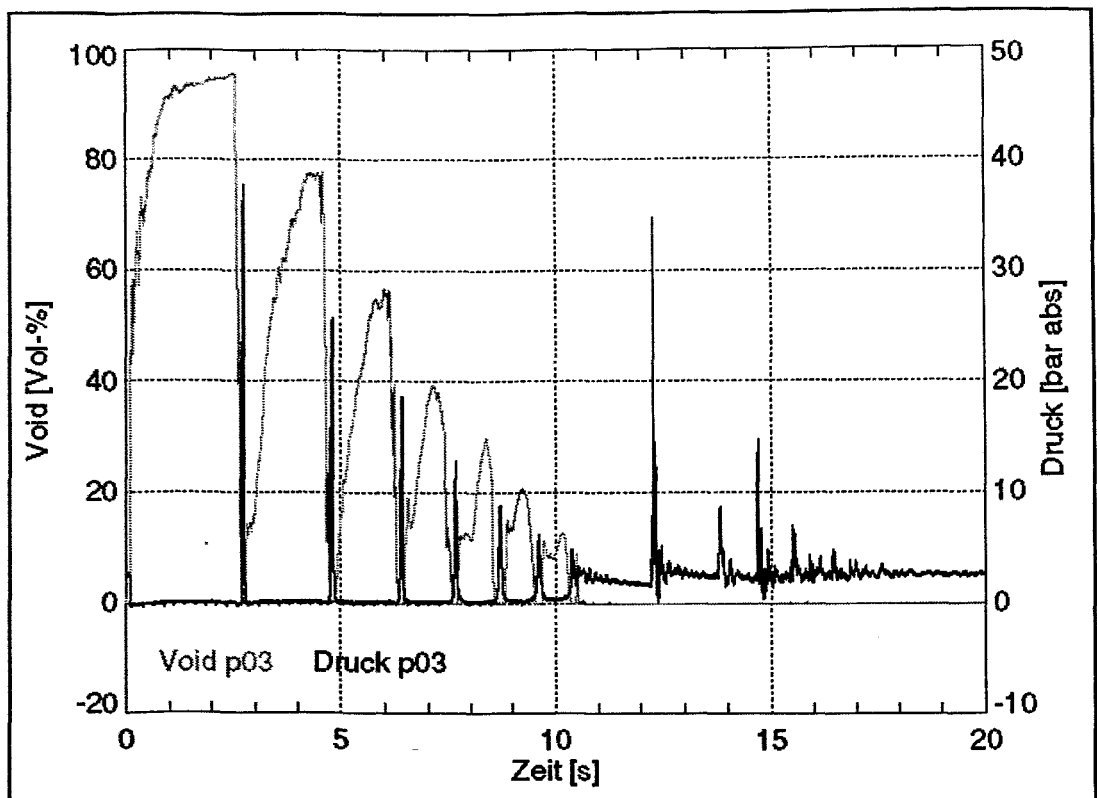


Abb. 6: Zeitliche Druck- und Voidverläufe nach dem schnellen Schließen einer Regelklappe (Meßposition: Regelklappe stromabwärts). Die stationäre Anfangsgeschwindigkeit betrug 3 m/s; Meßleitung DN100

In dem Diagramm sind der zeitliche Verlauf des Voidanteils (linke Skala, graue Kurve) über dem Rohrquerschnitt und der entsprechende Druckverlauf (rechte Achse, schwarze Kurve), beide direkt stromabwärts der Schnellschlußarmatur gemessen, dargestellt.

Durch das Schließen der Schnellschlußklappe wird aufgrund des daraus resultierenden Druckabfalls ($t = 0,3$ s) Dampf gebildet. Nach $t = 2,7$ Sekunden kommt es zu einem rapiden Absinken des Dampfgehaltes im Querschnitt. Zu diesem Zeitpunkt ist auch der erste Kavitationsschlag (schwarzer Peak) mit einer Druckspitze von etwa 36 bar ersichtlich. Deutlich zu erkennen ist die zeitliche Übereinstimmung von Kavitationsschlag und der Abnahme des Dampfgehaltes in der Meßleitung. Der Vorgang wiederholt sich aufgrund von Reibungseffekten im Rohr mit abnehmender Intensität.

Nach dem Öffnen der Armatur ($t = 10,5 - 11$ s) bei noch laufender Pumpe strömt Wasser in die Leitung, wobei der vorher entstandene Dampf schlagartig kondensiert ($p = 35$ bar bei $t = 12$ s). Dieser Druckanstieg wird vom Beobachter als der heftigste Schlag wahrgenommen. Während die vorangegangenen Dampfschläge als laute peitschenknallähnliche Geräusche gehört werden, äußert sich der letzte Schlag in einer heftigen Erschütterung des gesamten Rohrsystems.

Abb. 7 zeigt zehn Bilder aus einer VHS-Hochgeschwindigkeitsaufnahme. Man erkennt den zeitlichen Verlauf der Verteilung von Flüssigkeit und Dampf/Luft in der Rohrleitung nach einem Armaturenschnellschluß (für eine stationäre Flüssigkeitsgeschwindigkeit von 2.0 m/s und eine Schließzeit von 0,2 s). Die Entfernung des jeweils rechten Bildausschnitts zur Klappe beträgt 0.65 m. Die Bildaufnahmefrequenz betrug 1125 Hz. Eingesetzt wurde Trinkwasser von etwa 20 °C.

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

Weitere mit einer handelsüblichen Videokamera durchgeführte Aufnahmen haben gezeigt, daß ab dem 2. Kondensationsprozess einzelne Luftblasen als disperse Phase am oberen Leitungsrand verbleiben, deren Volumina je nach aktuellem Druck von etwa 1 bis zu 2-3 cm Durchmesser oszillieren. Dieser Ausgasungsprozeß von Luft aus Trinkwasser wurde u.a. auch von Perko [8] beobachtet.

4.1 Theoretische Arbeiten

Den Simulationen wurden die gemessenen Stellungen-Zeit-Verläufe der untersuchten Regelklappe (Fa. GESTRA ,Typ: UNIFORCE, DN100) sowie die Herstellerangaben für die Druckverluste eingegeben. Die berechnete Wellenausbreitungsgeschwindigkeit betrug 1240 m/s. Aus Laufzeitmessungen wurden 1220 m/s ermittelt. Die Geometrie der Versuchsanlage wurde gemäß Abb. 5 eingegeben.

Abb. 8 zeigt einen Vergleich von gemessenen und berechneten Druckverläufen an der Position p03 stromabwärts der Regelklappe (vgl. auch den gemessenen Druckverlauf aus Abb. 6).

Aus dem Diagramm ist zu erkennen, dass der erste Kondensationsschlag bei $t = 2,7$ s gut wiedergegeben wird (Rechnung: 32 bar - Messung: 38 bar). Im weiteren Verlauf ($t = 5 - 10$ s) liefert die Rechnung im Vergleich zur Messung höhere Drücke mit zunehmender zeitlicher Verschiebung.

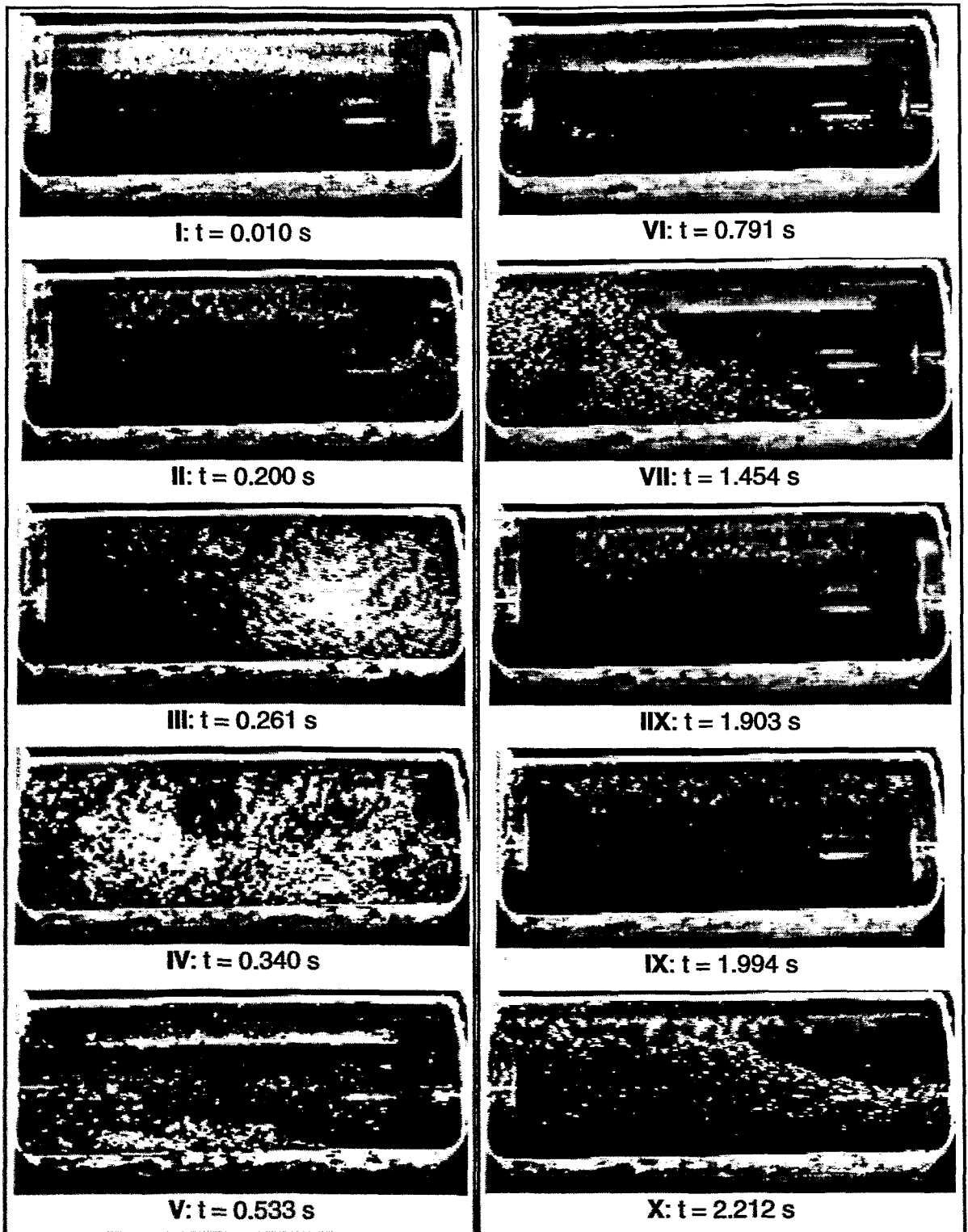


Abb. 4.7 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen an der Meßstelle p03 (ca. 0,5 m stromabwärts der schließenden Klappe); stationäre Strömungsrichtung von rechts nach links; stationäre Flüssigkeitsgeschwindigkeit: 2,0 m/s

Nach Wiederöffnen der Armatur bei $t = 10 - 10,5$ s berechnet das Programm mehrere Druckspitzen infolge von Kondensationsschlägen an verschiedenen Stellen in der Rohrleitung. Tatsächlich liefert die Messung nur *einen* wesentlichen Dampfschlag im oberen Bereich der Rohrbrücke.

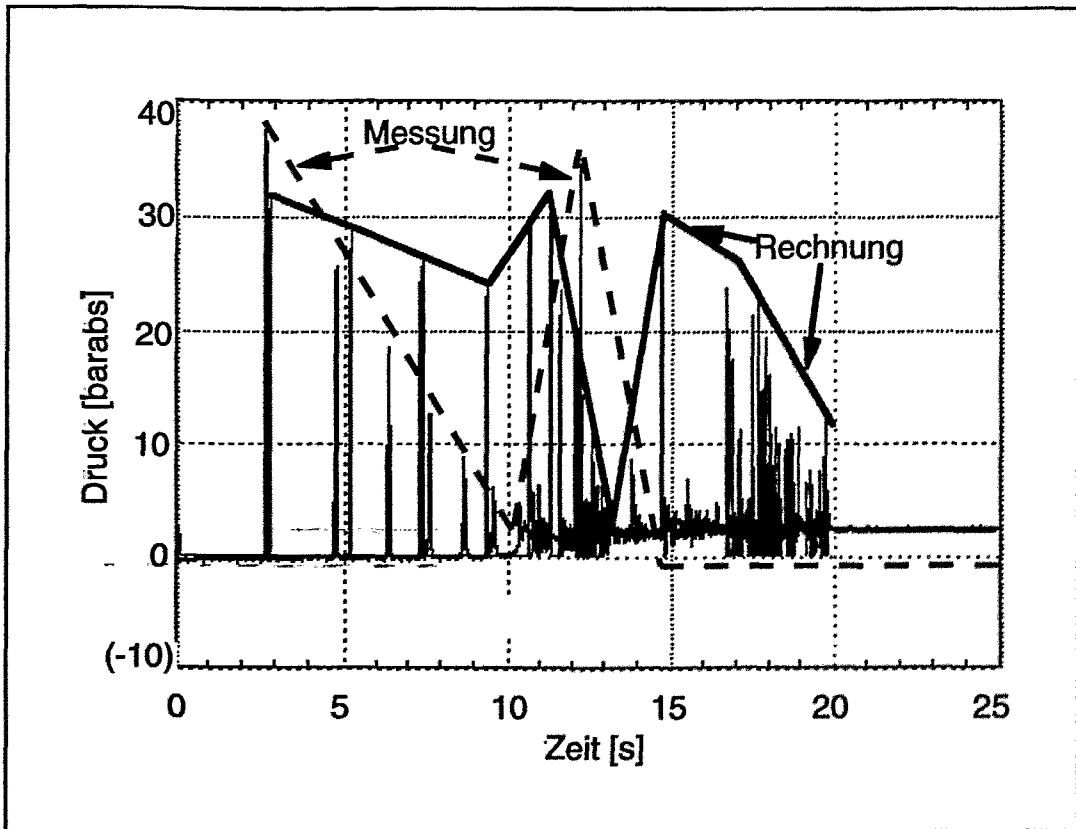


Abb. 8: Vergleich von gemessenem und berechnetem zeitlichen Druckverlauf nach dem schnellen Schließen einer Regelklappe. (Meßposition: p03; $v_0 = 3$ m/s; Meßleitung DN100; vgl. auch Abb. 6)

Die Abweichungen im Bereich bis 10 s sind auf Ausgasung von Luft aus dem Trinkwasser zurückzuführen. Die Luftblasen verbleiben auch bei der Dampfkondensation als disperse Phase im Leitungssystem und setzen die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit deutlich herab. Dieser Effekt wird von den o.g. Programmen z.Zt. noch nicht erfaßt.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag werden Versuchsergebnisse des laufenden BMBF-Forschungsvorhabens vorgestellt. Es werden die transienten Druckverläufe beim Schnellschluß einer Regelklappe gemessen und mit den Vorhersagen der Projektsoftware verglichen. Die berechneten Druckspitzen liegen im Bereich der gemessenen Werte.

Strömungsvisualisierungen zeigen, daß das Rechenmodell der konzentrierten Dampfkavitation bei Anwendung des Charakteristikenverfahrens anwendbar ist. Es kommt durch die Druckabsenkung im kavitierenden System zur Ausgasung von Luft, die bei der Kondensation als disperse Phase verbleibt und die Kondensationsschläge dämpft. Für längere Zeitperioden mit Systemdrücken unterhalb der Sättigungspartialdrücke der gelösten Gase muß mit einer verminderten Wellenausbreitungsgeschwindigkeit gerechnet werden.

Aufgrund eingehender Diskussion der o.g. Ergebnisse mit Fachleuten aus den Branchen Chemie, Kraftwerksbau, Anlagenbau, Versorgung, Software, Pumpen und Armaturen werden bei UMSICHT derzeit folgende Untersuchungen durchgeführt

- Versuche mit veränderter Klappenposition und mit einem Stellventil,
- Versuche mit disperser Luft,
- Berücksichtigung einer veränderlichen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit bei der Druckabsenkung durch Kavitation

6. Literaturverzeichnis

- [1] Thorley, A. R. D.: "Fluid Transients in Pipeline Systems"; D&L George LTD; 1991; Hadley Wood, Barnet, GB
- [2] Wylie, E. B.; Streeter, V. L.; Suo, L.: "Fluid Transients in Systems"; Prentice-Hall Inc.; 1993; Englewood Cliffs, New Jersey, USA
- [3] Sperber, A.; Raschke, E.: "Kondensationsschläge in Rohrleitungen - Messungen an einer Versuchsanlage und Simulationsmethoden"; 3R International, 35, Nr.6, 1997
- [4] Simpson, A. R.; Bergant, A.: "Interesting Lessons from Column Separation Experiments"; Proceedings of the 7th International Conference on Pressure Surges and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels; BHR Group Limited; London, GB; 1996; Seite 83-97
- [5] Sperber, A.; Schildberg, H.-P.; Walter, M.: "Dynamische Belastung von Rohr- und Behälterwandungen bei Detonation von Acetylen"; CIT, 68, Nr. 9, 1996; Seite 1144
- [6] Kottmann, A.: "Druckstoßermittlung in der Wasserversorgung"; Vulkan-Verlag, Essen, 1992
- [7] Prasser, H.-M.; Böttger, A.; Zschau, J.: "A New Wire-Mesh Tomograph for Gas-Liquid Flows", held on: Frontiers in Industrial Process Tomography II, Delft, The Netherlands, April 9-12, 1997, proceedings pp. 109-112.
- [8] Perko, H.-D.: "Gasausscheidung in instationärer Rohrströmung"; Institut für Strömungsmechanik und Elektronischen Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, Bericht Nr. 16/1985
- [9] "KODAK-EKTAPRO HS Motion Analyzer, Model 4540", Bedienungsanleitung; Kodak AG, Stuttgart

TRANSIENTES VERHALTEN EINER ZWEIPHASIGEN SCHWALLSTRÖMUNG IN HORIZONTALEN ROHREN - MESSEN VON INSTATIONÄREN PHASENVERTEILUNGEN

Dipl.-Ing. K. Grotjahn, Prof. Dr.- Ing D. Mewes

Institut für Verfahrenstechnik, Universität Hannover

Die transiente Strömung von Gasen und Flüssigkeiten wird beim Umschlag zwischen den Strömungsformen mit sich stationär oder instationär bewegenden Pfropfen und Schwallen untersucht. Schwall- und Pfropfenströmung sind in energie- und verfahrenstechnischen Prozessen die am häufigsten zu beobachtenden Strömungsformen von Gas-Flüssigkeitsgemischen in horizontal oder geneigt verlegten Rohrleitungen. Sie werden durch alternierend in der Rohrleitung strömende Gaskolben und Flüssigkeitspfropfen gekennzeichnet. Der Beginn des transienten Übergangs zwischen den zwei Strömungsformen ist durch den Beginn des Gasentrainments der Flüssigkeitspfropfen festgelegt. Der hohe Reibungsdruckverlust der Pfropfenströmung sinkt im Bereich der Transiente mit steigendem Gasvolumenstrom. Für ein konstant anliegendes Druckgefälle ist die Transiente mit einer starken Erhöhung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und somit der auf die Rohrwände und -armaturen ausgeübten Impulskräfte verbunden. Diese sind wiederum in starkem Maß von den relativen Phasenanteilen im Querschnitt des Rohres abhängig. Neben dem Messen der den Schwall kennzeichnenden charakteristischen Geschwindigkeiten der Phasen ist zur vollständigen Beschreibung und Berechnung der physikalischen Vorgänge und Strömungsfelder im Bereich der Transiente das Messen der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Phasenanteile mit hoher Auflösung notwendig. Mit häufig verwendeten Meßverfahren, wie z.B. der Ringelektrode oder dem γ -Strahl-Densitometer ist die Phasenverteilung in einem Meßquerschnitt jedoch nur integral zu messen.

Im vorliegenden Beitrag werden Meßmethoden erläutert, die zur Messung der zweiphasigen Schwallströmung aus Luft und Wasser eingesetzt werden. Ergebnisse werden dargestellt. Für die experimentellen Untersuchungen wird eine 66m lange horizontale Meßstrecke (Innendurchmesser von 59 mm) eingesetzt. Zur Messung der Phasenverteilung dient ein tomografisches Meßverfahren auf der Basis der elektrischen Leitfähigkeiten der Phasen. Der Sensor besteht aus parallelen Drähten. Diese sind in drei Ebenen mit 2mm Abstand aufgebaut. Die Ebenen bestehen aus jeweils 29 Drähten. Sie sind um 60° gegeneinander versetzt und senkrecht zum Strömungsquerschnitt angeordnet.

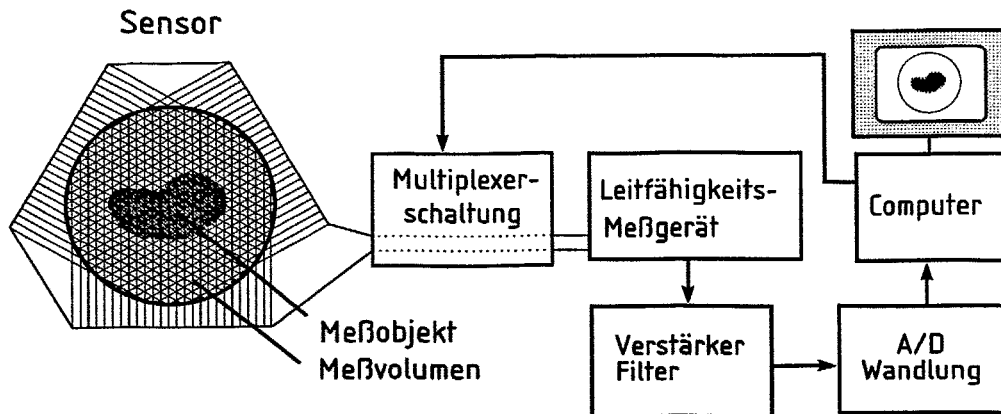


Bild 1: Meßkette des tomografischen Meßverfahrens

Der freie Querschnitt des Sensors ist für eine Drahtstärke von 100µm größer als 95%. Der Sensor wird in den betrachteten Rohrquerschnitt eingebaut und während einer Messung von den Phasen durchströmt. Zwischen zwei benachbarten Drähten wird die Leitfähigkeit gemessen. Für einen Zeitschritt werden für alle drei Ebenen je 28 unabhängige Meßwerte der Leitfähigkeit gespeichert. Das Abtasten der einzelnen Drahtpaare wird mit einer Multiplexerschaltung durchgeführt. Die gemessenen Leitwerte sind den Flüssigkeitsgehalten zwischen den jeweiligen Drahtpaaren direkt proportional. Mit Hilfe eines iterativen Rekonstruktionsverfahrens erfolgt nach Abschluß einer Messung die Berechnung der Phasenverteilung aus den Leitwerten mit einer räumlichen Auflösung von weniger als 0,1% des Strömungsquerschnittes. Die Verteilung der Phasen im Querschnitt wird im Abstand von 110 Hz gemessen.

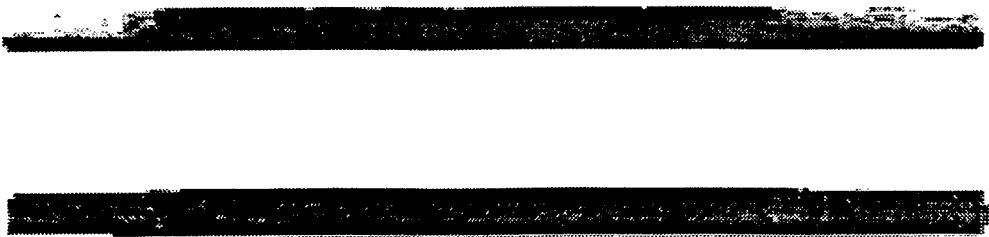


Bild 2: Eulersche Darstellung der rekonstruierten Schwalleinheit

Ausgehend von der Rekonstruktion der Phasenverteilung und der so vorhandenen dreidimensionalen Datensätze werden verschiedenen Darstellungsformen oder die Berechnung des gesamten Flüssigkeitsgehaltes im Schwall möglich. Durch das Hintereinanderschalten der zweidimensionalen, im Abstand von 0,009 s aufeinanderfolgenden Querschnittssegmente der Phasenverteilung entsteht die Eulersche Darstellung der Phasenverteilung des gesamten Schwallbereiches. Schnittbilder in verschiedenen Ebenen des Rohres werden dargestellt.

Erfahrungen mit nadelförmigen Leitfähigkeitssonden zur Bestimmung von Parametern in Zweiphasenströmungen

Dipl.-Ing. S. Fleischer, Prof. Dr.-Ing. habil. R. Hampel

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Sozialwesen Zittau/Görlitz (FH)

Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik

D - 02763 Zittau, Theodor-Körner-Allee 16

Tel: +49-(0)3583-61-1543, Fax: +49-(0)3583-61-1288

E-mail: fleischer@novell1.ipm.htw-zittau.de

E-mail: hampel@novell1.ipm.htw-zittau.de

1 Einleitung

Zur Beschreibung der Vorgänge in Zweiphasenströmungen ist die experimentelle Bestimmung von aussagefähigen Parametern und Kenngrößen, wie zum Beispiel die Verteilung der Phasen und deren Geschwindigkeiten, unerlässlich.

Je nach Meßgröße, Eigenschaften des Mediums und ausnutzbare physikalische Effekte existieren eine Reihe von verschiedenen Meßverfahren. Im folgenden werden das Meßprinzip und Erfahrungen mit nadelförmigen Leitfähigkeitssonden dargestellt. Der ausnutzbare physikalische Effekt ist die unterschiedliche elektrische Leitfähigkeit der flüssigen und gasförmigen Phase. Das Meßverfahren mit nadelförmigen Leitfähigkeitssonden ist ein invasives Meßverfahren, da die Sonden lokal in der Strömung installiert sind. Mit dem Verfahren sind Gasgehalt, Gasphasengeschwindigkeit, Blasengröße und deren lokale, räumliche und zeitliche Verteilungen meßbar.

2 Meßprinzip und Einflußgrößen

Durch die unterschiedlichen Leitfähigkeiten der Phasen wird mit den nadelförmigen Leitfähigkeitssonden der zeitliche Kontakt der jeweiligen Phasen an den Sondenspitzen detektiert. Es entsteht ein impulsförmigen Meßsignal, das einen quasibinären Charakter aufweist und dem Kontakt mit den Phasen entspricht. In Abbildung 1 ist das Meßprinzip dargestellt. Das Meßverfahren ist in transienten und stationären Strömungen einsetzbar und liefert eine hohe zeitliche Auflösung (ca. 10^{-4} s). Die Sonden sind lokal in der Strömung angeordnet und können somit nur am Detektorort Informationen über den Strömungszustand liefern. Das Meßverfahren ist nicht berührungsfrei zur Strömung. Es sind Einflußgrößen zu beachten, die die Messungen bzw. die Strömung beeinflussen. Wesentliche Einflußgrößen sind:

↳ Sondengeometrie

Durch die Sonde werden Gasblasen, die auf die Sonde auftreffen, abgebremst, deformiert oder abgelenkt. Wird eine Gasblase nicht annähernd zentral durchstoßen, wird sie ab einem bestimmten „kritischen Abstand“ zur Blasenmitte so abgelenkt, daß sie nicht erfaßt wird. Gasblasen, welche in ihrem Durchmesser kleiner als der Sondendurchmesser sind, werden nicht vollständig erfaßt.

↳ Potentialfeld der Sonde

Durch den Stromfluß entsteht ein Potentialfeld. Das Potentialfeld in unmittelbarer Umgebung der Sonde bestimmt den Verlauf der Spannungsänderung in der Annäherungsphase der Gasblase zur Sondenspitze, wodurch sich unterschiedliche Steilheiten der Flanken im Meßsignal ausbilden.

↳ Entnetzung- und Benetzung der Sonde

Die Entnetzung und Benetzung der Sondenspitze beeinflussen wesentlich die Ausbildung der Flanken des Meßsignals. Bei der idealen Sonde wird ein ungestörtes Potentialfeld und eine unendlich schnelle Ent- und Benetzung der Sonde vorausgesetzt. Durch die gegenüber der idealen Sonde langsameren Ent- und Benetzungen der Sonde entstehen im Signalverlauf Flanken, welche zu einer Unschärfe in der Kontaktzeitmessung führen. Die Entnetzungs- und Benetzungsvorgänge werden durch die Geschwindigkeit der auf die Sonde auftreffenden Gasblasen mitbestimmt.

↳ Parameter der Flüssigkeit

Leitfähigkeit, Viskosität, Oberflächenspannung beeinflussen die Ausbildung des Potentialfeldes sowie die Ent- und Benetzungsvorgänge an der Sonde.

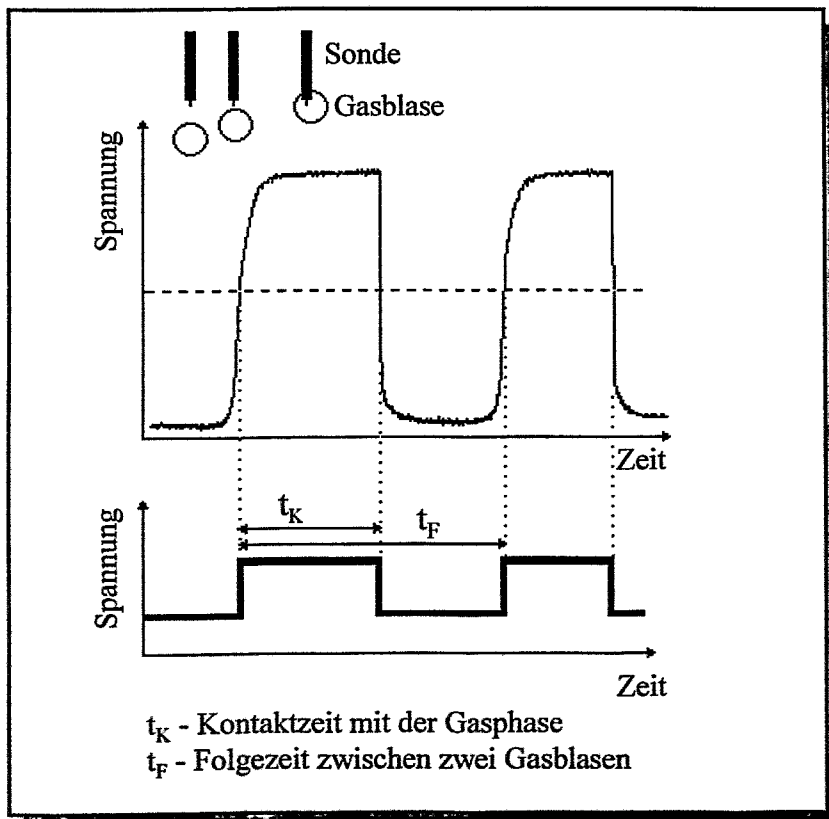


Abbildung 1: Darstellung des Meßprinzips

3 Anwendung des Meßverfahren

3.1 Messung des Gasgehaltes

Aus den an der Sondenspitze anliegenden Kontaktzeiten der Phasen wird der zeitliche Gasgehalt wie folgt definiert: $\varphi = \frac{t_K}{t_F}$ (1)

mit φ - zeitlicher Gasgehalt
 t_K - Kontaktzeit mit der Gasphase
 t_F - Folgezeit bis zum nächsten Gasphasenkontakt

Diese Definition des Gasgehaltes bezieht sich auf die Einzelgasblase. Das stochastische Auftreten der Gasblasen kann sehr gut verfolgt werden und die statistischen Verteilungen von Gasgehalt, Kontaktzeit und Gasblasenfolgefrequenz bestimmt. Auf Grund des stochastischen Charakters der Strömung ist der zeitlich gemittelte Gasgehalt von Interesse. Folgende Definitionen sind möglich:

• arithmetischer Mittelwert: $\bar{\varphi} = \frac{\sum t_K}{\sum t_F}$ bzw. $\bar{\varphi} = \frac{\sum t_K}{t_M}$ bzw. $\bar{\varphi} = \frac{\sum_{i=0}^N \varphi(i)}{N+1}$ (2)

• gleitender Mittelwert: $\bar{\varphi}_n = \frac{\sum_{k=0}^N \varphi_{n-k}}{N+1}$ (3)

• exponentieller Mittelwert: $\bar{\varphi}_n = \frac{\sum_{k=0}^N \varphi_{n-k}}{N+1} - \frac{\sum_{k=0}^M \bar{\varphi}_{n-k}}{M+1}$ (4)

t_M - Messzeit
 N, M - Anzahl der Einzelmessungen

Auf Grund der Einflußgrößen auf die Messung sind folgende Fehler in der Gasgehaltsmessung zu beachten:

↳ Fehler in der Kontaktzeitmessung

Je größer die Gasblasen sind, desto kleiner werden die Fehler in der Kontaktzeitmessung. Der Fehler in der Gasgehaltsmessung berechnet sich:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{t_F} \cdot \Delta t_K \text{ bzw. } \Delta\bar{\varphi} = \frac{1}{t_M} \cdot \sum \Delta t_K \quad (5)$$

$\Delta\varphi$ - Fehler des Gasgehaltes; Δt_K - Fehler in der Kontaktzeit

Eine Fehlerminimierung kann durch die Kalibrierung erreicht werden, indem die Triggerschwelle (Abb. 1) angepaßt wird.

↪ Fehler durch nicht erfaßte Gasblasen

Der Fehler durch nicht erfaßte Gasblasen, kann mit der Festlegung der Triggerschwelle nicht eliminiert werden. Mit alternativen Vergleichsmessungen (z.B. nichtinvasives Impedanzmeßverfahren) sind Kalibrierungsfaktoren für die Gasgehaltsmessung ableitbar.

↪ Fehler durch nicht zentrales Auftreffen der Gasblase an der Sondenspitze

Durch die feste lokale Position der Sonden wird ein geringer Anteil, der auf die Sonde auftreffenden Gasblasen, zentral getroffen. Der größte Anteil der gemessenen Kontaktzeiten entsprechen Sehnenlängen der Gasblasen. Gegenüber dem Blasendurchmesser wird ein zu kleiner Gasgehalt ermittelt. Aussagen über die Blasengrößenverteilung sind mit statistischen Untersuchungen der Kontaktzeit- bzw. Sehnenlängenverteilung durchführbar. Des weiteren muß für die Ermittlung der Blasengröße die Geschwindigkeit der Gasblase bekannt sein. Abschnitt 3.2 stellt Verfahren zur Geschwindigkeitsmessung und zum Erkennen zentraler Gasblasendurchstöße an der Sondenspitze vor.

3.2 Messung der Gasblasengeschwindigkeit

Für die Messung der Gasblasengeschwindigkeit stehen drei Verfahren zur Verfügung:

↪ Bestimmung der Gasblasengeschwindigkeit mit Hilfe von Mehrpunktsonden

Das Verfahren ist in Abbildung 2 dargestellt. Durch den bekannten Abstand der Sonden und der Kontaktzeitmessung ist die Einzelgasblasengeschwindigkeit, der an der Sondenspitze anliegenden Gasblase, meßbar. Fehler, die hierbei auftreten, sind die Deformierung und Abbremsung der Gasblase an der Sondenspitze und das gestörte Potentialfeld um die Sonde. Die Laufzeit der Gasblase zwischen den Sondenpunkten liegt in der Größenordnung der Entnetzungszeit, so daß der Entnetzungsvorgang und das Potentialfeld bei der Geschwindigkeitsmessung zu beachten ist. Durch Auswahl geeigneter Sonden, Verwendung von hochfrequenter Meßspannung und Kalibrierung ist eine Reduzierung des Meßfehlers erreichbar.

↪ Bestimmung der Gasblasengeschwindigkeit mit Hilfe von zwei übereinander angeordneten Einpunktsonden

Mit Hilfe des Kreuzkorrelationsverfahrens ist eine mittlere Laufzeit der Gasblasen zwischen den Sonden und damit eine mittlere Gasblasengeschwindigkeit meßbar. Einzelgasblasengeschwindigkeiten können nicht ermittelt werden.

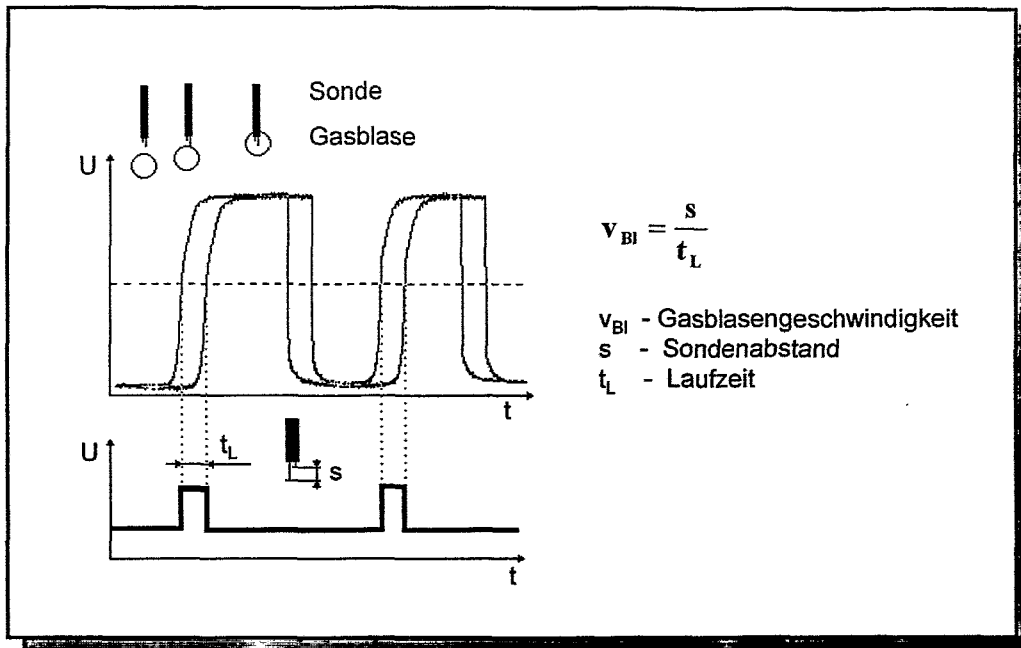


Abbildung 2 : Messung der Gasblasengeschwindigkeit

↳ Bestimmung der Gasblasengeschwindigkeit aus der Entnetzungsphase

Zur Messung der Gasblasengeschwindigkeit wird der Entnetzungsprozess an der Sondenspitze einer Signalanalyse unterzogen. Der Verlauf des Entnetzungsprozesses (Anstiegsflanke im Meßsignal) wird von folgenden Einflußgrößen bestimmt:

- ↳ Position der Sonde zur Gasblase
 - zentraler und nicht zentraler Durchstoß
 - Neigung der Sonde gegenüber der Gasblase
- ↳ Leitfähigkeitseinflüsse des Mediums
- ↳ Geschwindigkeit der Gasblase
- ↳ Sondengeometrie

In Abbildung 3 ist das Verfahren der Signalanalyse dargestellt. Die Amplitude der Anstiegsflanke wird diskretisiert. Für die jeweiligen Diskretisierungsintervalle der Amplitude werden die zugehörigen Zeitabschnitte bestimmt. Die invertierten Zeitdifferenzen werden über den Amplitudenabschnitten aufgetragen und ergeben ein Signalmuster, das weiter ausgewertet wird.

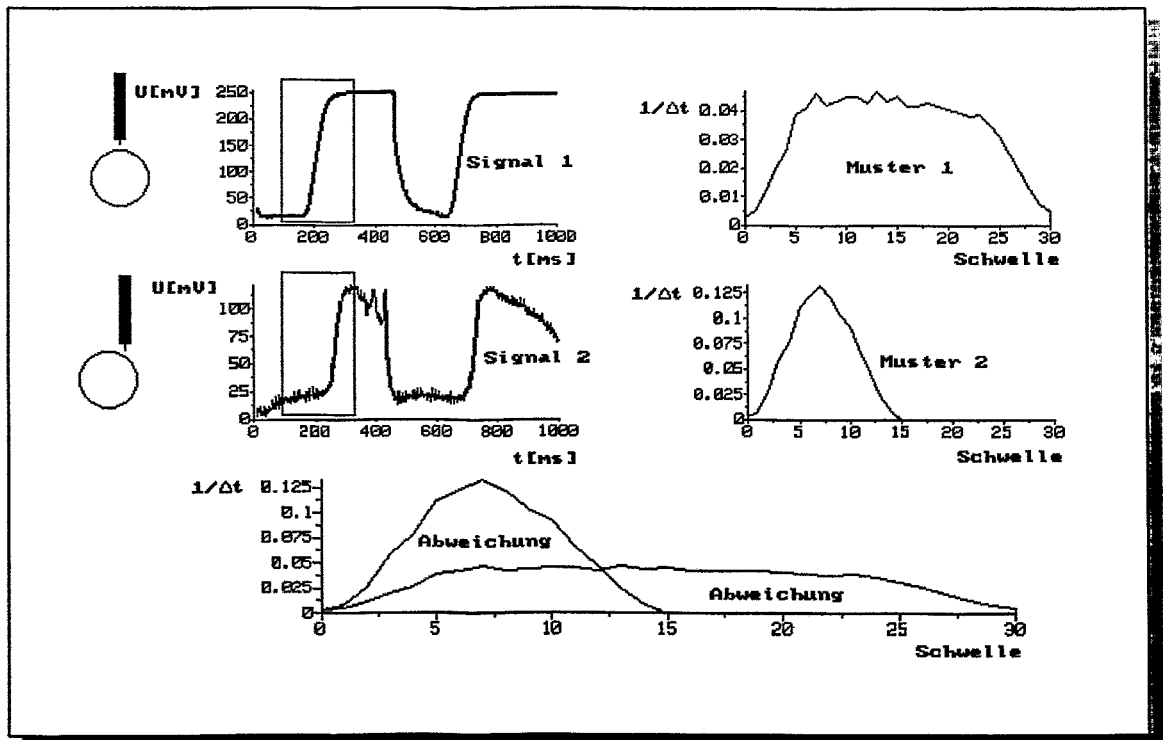


Abbildung 3: Signalanalyse der Anstiegsflanke

Für die Geschwindigkeitsmessung müssen die einzelnen Einflüsse selektiert werden können bzw. dürfen keinen Einfluß auf die Geschwindigkeitsmessung ausüben. Dies ist der Fall, wenn die Gasblase annähernd zentral durchstoßen wird. Ziel der Signalanalyse ist es, Gasblasen mit einen annähernd zentralen Durchstoß zu erkennen. Für die selektierten Gasblasen wird anschließend aus der Anstiegsflanke die Gasblasengeschwindigkeit und damit der Blasendurchmesser bzw. Sehnenlänge bestimmt.

$$\text{Gasblasengeschwindigkeit: } v_{Bl} = \frac{K}{t_A} \quad (6)$$

$$\text{Gasblasendurchmesser : } d_{Bl} = v_{Bl} \cdot t_K \quad (7)$$

K - Kalibrierungsfaktor
 t_A - Zeit der Anstiegsflanke

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen Signalmuster für eine Sonde mit einem Sondenspitzendurchmesser von 0.2 mm und 1 mm Kontaktlänge. Die Untersuchungen für das aufgezeigte Beispiel wurden in einer axialen Einperlströmung mit einem Strömungsrohrdurchmesser von 10 mm durchgeführt. Zur Ermittlung der Gasblasengeschwindigkeit, Gasblasengröße und Gasgehalt wurden optische und kapazitive Verfahren als Vergleichsmessungen eingesetzt.

Die größten Unterschiede in den normierten Signalmustern zeigen sich für nicht zentrale Durchstöße (Verschiebung) und größeren Neigungen der Sonde zur Strömungsrichtung.

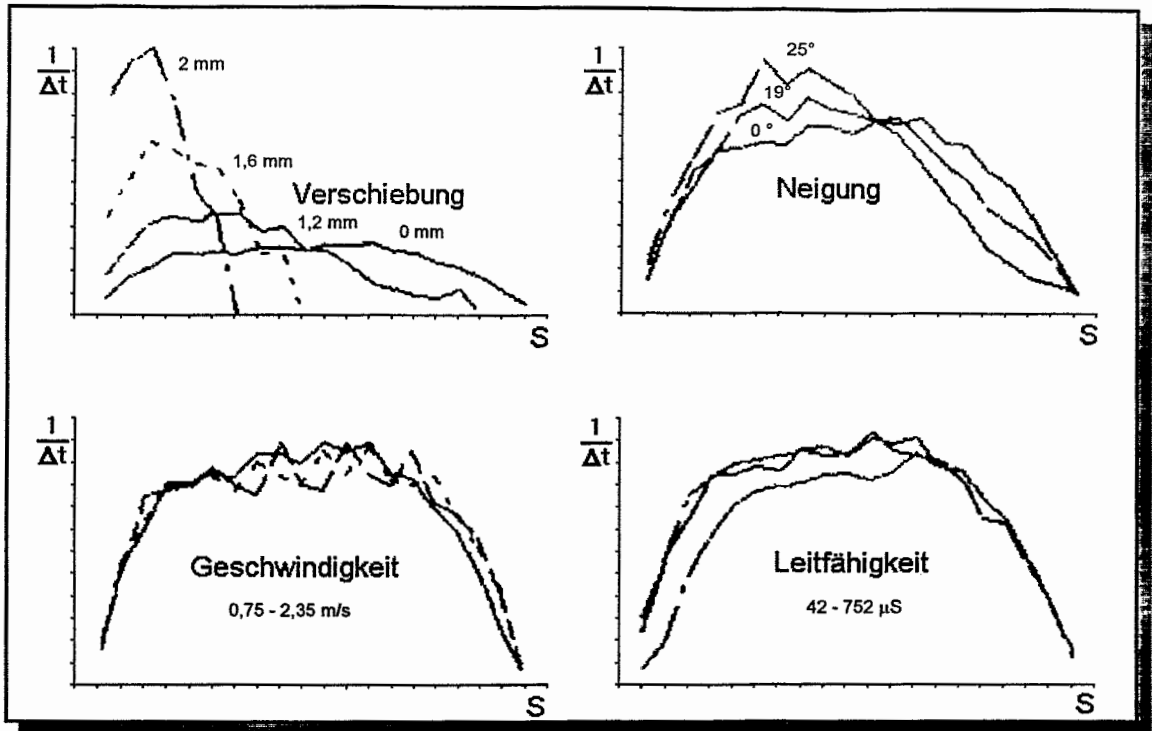


Abbildung 4: normierte Signalmuster für verschiedene Signalmuster

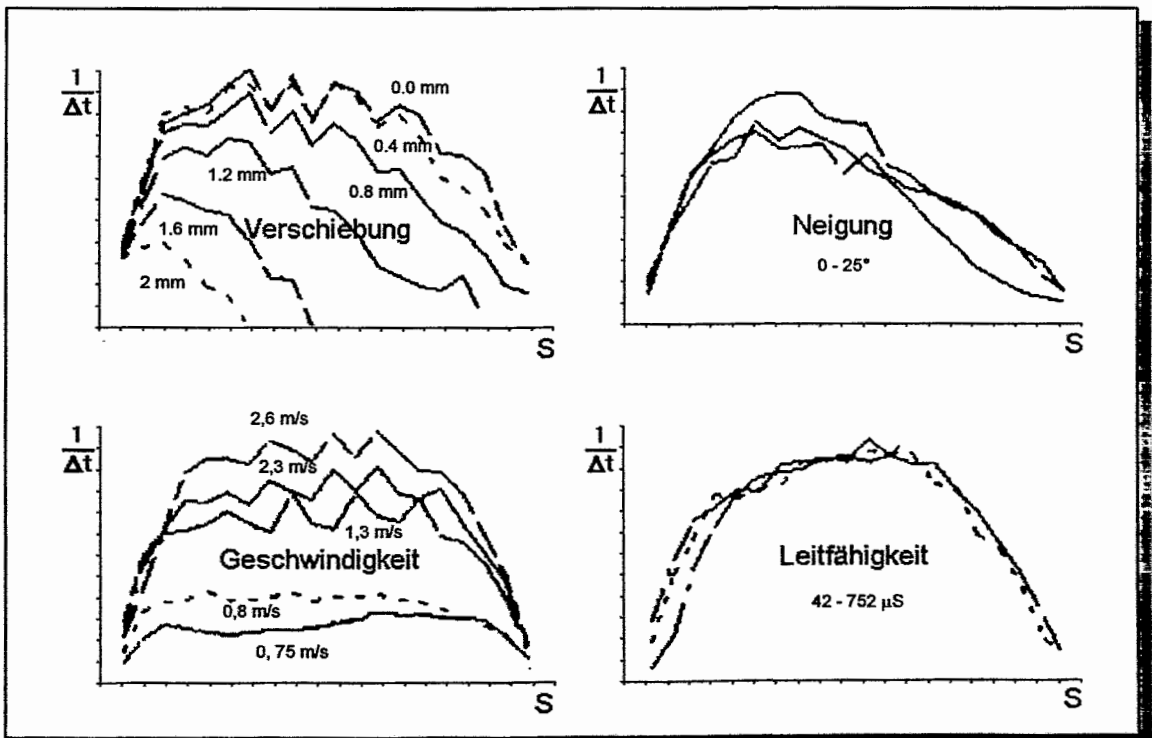


Abbildung 5: nicht normierte Signalmuster für verschiedene Einflüsse

Für Geschwindigkeits- und Leitfähigkeitseinflüsse sind im Signalmuster relativ geringe Abweichungen feststellbar. Durch Auswertung der Flächenabweichung ist ein zentraler Durchstoß einer Gasblase detektierbar. Für die selektierten Gasblasen wird anschließend aus den nicht normierten Signalmustern bzw. direkt aus der Anstiegsflanke mit Hilfe einer statischen Kennlinie die Geschwindigkeit für die Gasblasen bestimmt.

Anhand dieser Untersuchungen zeigte es sich, daß nur bestimmte Sondengeometrien zur Geschwindigkeitsmessung aus der Anstiegsflanke geeignet sind. Sonden mit größeren Sondenspitzendurchmessern ($> 1\text{mm}$) und sehr kleinen Kontaktlängen (nahezu Punktf lächen) lassen eine Auswertung der Anstiegsflanke nicht zu.

3.3 Messung des Gemischfüllstandes in Behältern

Die Messung des Gemischfüllstandes bzw. der Gemischfüllstandsbewegung und der axialen Gasgehaltsverteilung erfordert eine vertikale Anordnung der Sonden im Behälter. In Abhängigkeit von der Anzahl der eingesetzten Sonden und Behälterhöhe ergibt sich die vertikale Diskretisierung der Gemischfüllstandsmessung.

Die Medienverteilung im Behälter kann folgende Zustände annehmen:

- ↳ ideale Phasentrennung (kein Zweiphasengemisch)
- ↳ in der flüssigen Phase sind Gasphasenanteile vorhanden ($0 < \varphi < 1$)
 - ↳ ohne Schaumzone
 - ↳ mit Schaumzone

Mit Approximationverfahren für die diskrete axiale Gasgehaltsverteilung bzw. zeitlichen Gemischfüllstandsbewegung (Abbildung 6 und 7) kann der Gemischfüllstand und Gasgehalt zwischen den Meßpunkten abgeschätzt werden. Das Verfahren der diskreten Gemischfüllstandsmessung mit nadelförmigen Leitfähigkeitssonden eignet sich für stationäre und transiente Prozesszustände. Letztere treten vor allen bei Druckentlastungen auf. Im Falle des Auftretens von Prozeßzuständen mit Schaumbildung, ist mit dem Verfahren die Lage und Höhe der Schaumzone bestimmbar. Die Messung des Gasgehalt in der Schaumzone ist mit den Sonden nur bedingt möglich, da durch die Struktur des Schaumes der Phasenkontakt an der Sondenspitze nicht eindeutig detektierbar ist.

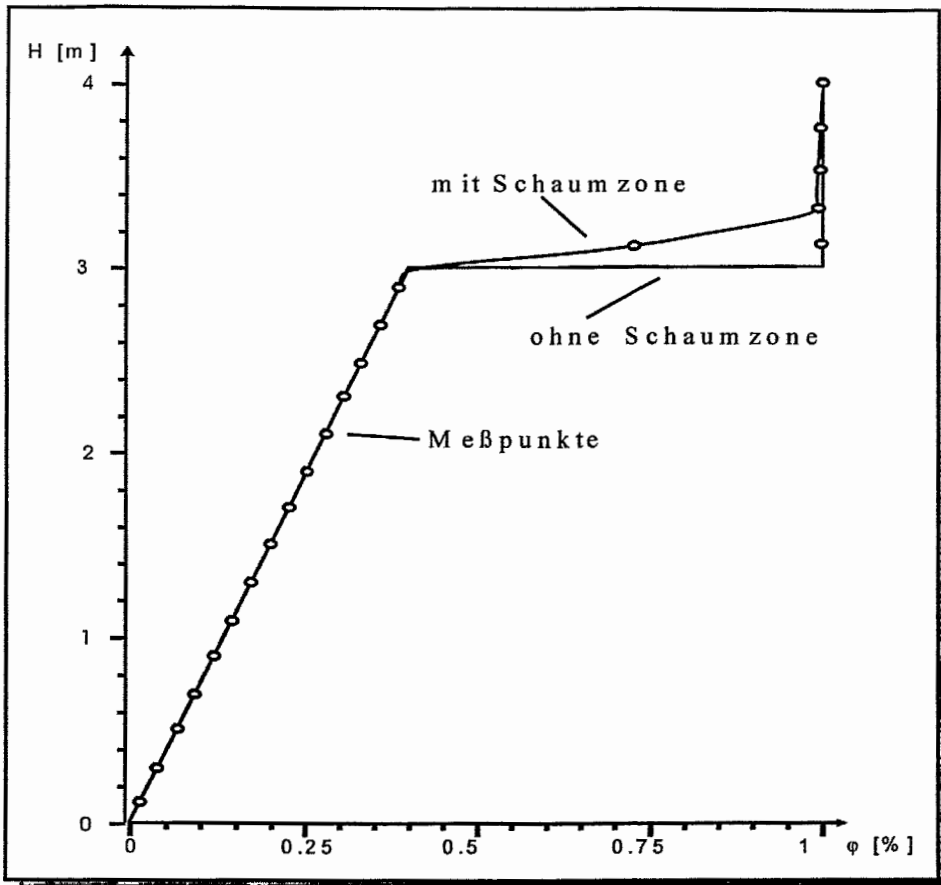


Abbildung 6: axiale Gasgehaltsverteilung in Behältern mit zwei-phasigen Inhaltsmedien

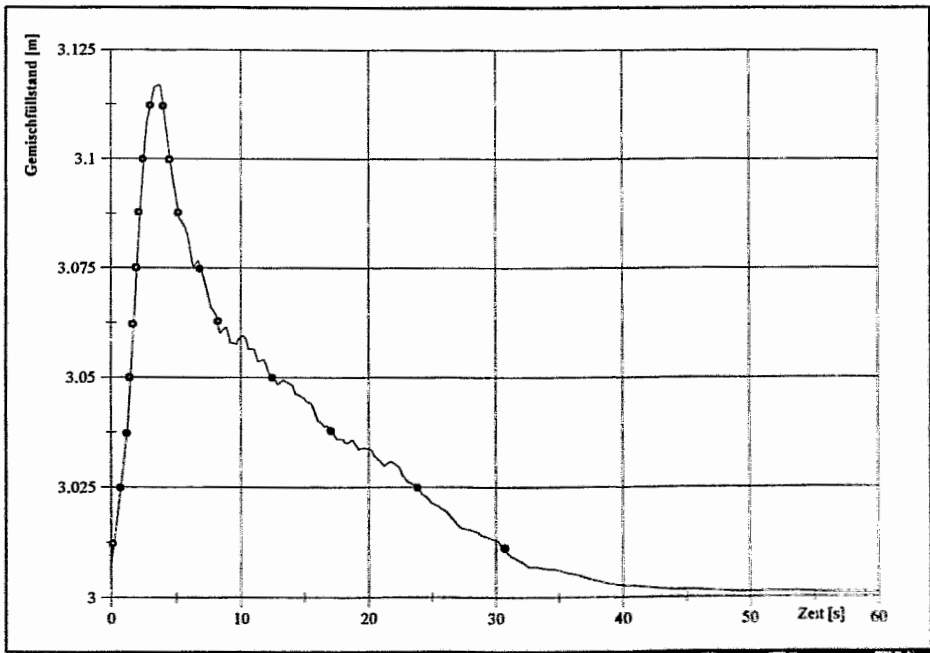


Abbildung 7: Druckentlastung mit Aufwallen des Gemischfüllstandes

3.4 Erkennung von Strömungsformen

Mit dem Meßverfahren ist eine Identifikation der Strömungsform (z.B. Blasen-, Propfen-, Schaumströmung und andere) durchführbar. Mögliche Verfahren zur Strömungsidentifikation mit nadelförmigen Leitfähigkeitssonden sind:

- ↳ Autokorrelation des Zeitsignals und Autoleistungsdichtespektrum,
- ↳ Auswertung der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Kontaktzeit,
- ↳ Auswertung der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Blasengröße,
- ↳ Auswertung der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung des Gasgehaltes,
- ↳ Korrelation zwischen Gasgehalt und Blasenanzahl bzw. Blasenfolgefrequenz.

Als Beispiel wird das Verfahren der Strömungsidentifikation aus Gasgehalt kurz dargestellt.

Für die gemessenen Gasgehalte wird innerhalb eines Meßabschnittes die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung $w(\varphi)$ erstellt. In der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung sind Charakteristika (Abbildung 8) enthalten die einer Strömungsform entsprechen bzw. zugeordnet werden können.

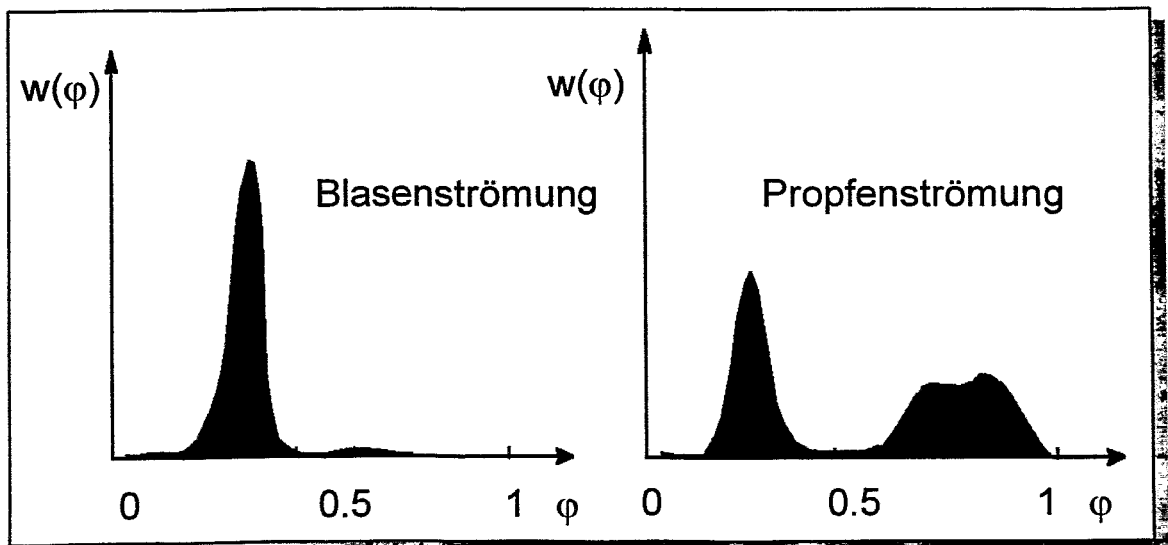


Abbildung 8: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung des Gasgehaltes

Der Kennwert K_s für die Strömungsform ist aus der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung wie folgt ableitbar:

$$K_s = \int_a^b w(\varphi) \cdot d\varphi \quad \text{mit } 0 \leq K_s \leq 1 \quad (8)$$

Mit der Wahl der Integrationsgrenzen a und b wird K_s für die Strömungsform eingestellt. Im vorliegenden Beispiel bieten sich die Integrationsgrenzen $a=0$ und $b=0.5$ an. Folgende K_s -Werte würden sich ergeben:

$1.0 > K_s > 0.8$	⇒	Blasenströmung
$0.8 > K_s > 0.4$	⇒	Propfenströmung
$0.4 > K_s > 0.0$	⇒	Ringströmung

Die Festlegung der Bereichsgrenzen ist insofern schwierig, da die Strömungsformen nicht abrupt wechseln. Vielmehr besteht ein weicher Übergang der Strömungsformen. In dieser Hinsicht könnten Methoden der Fuzzy-Theorie bessere Informationen liefern.

Die oben genannten Verfahren für die Strömungsformerkennung sollten kombiniert angewandt werden, um eine höhere Aussagefähigkeit zu erreichen.

4 Zusammenfassung

Das Meßverfahren mit nadelförmigen Leitfähigkeitssonden eignet sich zur lokalen Messung des Gasgehaltes, der Gasphasengeschwindigkeit, der Gasblasengröße und deren statistischen Verteilungen. Die hohe zeitliche Auflösung erlaubt die Messung von transienten Vorgängen in Zweiphasenströmungen. Mit dem Einsatz von mehreren Leitfähigkeitssonden ist eine räumlichen Auflösung möglich. Als qualitative Größe ist mit dem Meßverfahren die Strömungsform detektierbar.

Auf Grund des invasiven Charakters des Meßverfahren sind Einflußgrößen zu beachten bzw. zu berücksichtigen.

In den durchgeführten experimentellen Arbeiten wurde die Wirkung der Einflußgrößen auf das Meßergebnis näher untersucht und Verfahren zur Kalibrierung entwickelt. Die Arbeiten sind in den nachstehenden Literaturangaben dokumentiert.

5 Literatur

[1] Wiechetek, Hartmut

„Untersuchung von Kalibrierungsverfahren zur Messung des Volumengasanteils und der Blasengeschwindigkeit in einer Zweiphasenströmung mit nadelförmigen Leitfähigkeitssonden“

Technische Hochschule Zittau Diplomarbeit 1988

[2] Krieg, Hartmut

„Messungen in einer realen Zweiphasenströmung mit Eindrahtsonden unter Anwendung des Verfahrens der Mustererkennung von Gasblasen, zur Ermittlung der Parameter der Zweiphasenströmung“

Technische Hochschule Zittau Diplomarbeit 1989

[3] Soppart, Jan

„Messung der Blasengeschwindigkeit in einer Einperlströmung mit Eindraht- und Zweidrahtsonden. Analyse der SONDENSIGNALE und Fehlerabschätzung für die Geschwindigkeitsmessung“

Technische Hochschule Zittau Diplomarbeit 1992

LEITFÄHIGKEITSSENSOREN FÜR DIE BESTIMMUNG VON PARAMETERN IN EINER ZWEIPHASENSTRÖMUNG

H.-M. Prasser

Forschungszentrum Rossendorf e.V. (FZR), PSF 510119, D-01314 Dresden

1. Überblick: Zweiphasenmeßtechnik im FZR

Im Institut für Sicherheitsforschung des FZR werden verschiedene Meßverfahren für Zweiphasenströmungen entwickelt. Die Arbeiten sind in der Abteilung Störfallanalyse angesiedelt. Der Ausgangspunkt war die Notwendigkeit von lokalen Dampfgehaltsmessungen bei thermohydraulischen Experimenten zur Kernreaktorsicherheit. Deshalb sind alle Aktivitäten bisher auf die Untersuchung von Flüssigkeits-Gas- bzw. Flüssigkeits-Dampfgemische gerichtet gewesen. Das erste, speziell für den Einsatz bei Störfallsimulationen an sog. integralen Primärkreismodellen von Kernreaktoren mit Druckwasserreaktor entwickelte Meßverfahren waren nadelförmige Leitfähigkeitssonden. Mittlerweile hat sich das Profil hinsichtlich der Zweiphasenmeßtechnik deutlich erweitert. Zu den seit einigen Jahren erfolgreich bei verschiedensten sicherheitstechnischen Experimenten eingesetzten Leitfähigkeitssonden kamen Verfahren, die auf Ultraschall, Positronenemittern und Video-Bildverarbeitungsmethoden beruhen. Was die Leitfähigkeitsmessung betrifft, so wurde in der letzten Zeit ein Gittersensor entwickelt, der eine zeitlich hochauflösende Visualisierung der Strömung in Rohrleitungen ermöglicht. Auf dieses Verfahren wird in diesem Vortrag besonders eingegangen. Über die Methoden hinaus, zu denen eigene Entwicklungsarbeit betrieben wird, werden auch die Kapazitätstomographie (Process Tomography Ltd. Manchester), die Laser-Doppler-Anemometrie, gekoppelt mit einem Laser-Doppler-Partikel-Analysator (LDA/LDPA, Polytech, Aerometrics) und natürlich die hydrostatische Dichtemessung für Zweiphasenmessungen angewendet. Kurz einige Informationen zu den Eigenentwicklungen des FZR, die nicht auf der Leitfähigkeitsmessung beruhen:

Ultraschall

Als Alternative zum Ansatz, einzelne Gasblasen mit Ultraschall zu orten sowie deren Größe und Geschwindigkeit zu bestimmen, wurde im FZR versucht, die statistischen Fluktuationen eines Durchschallungssignals mit Hilfe von Methoden der Mustererkennung zu bearbeiten. Die Charakterisierung von einzelnen Partikeln versagt bereits bei kleineren Gasgehalten, während ein Durchschallungssignal als solches bis hin zu hohen Gasanteilen weit über 50 % noch aufgenommen werden kann. Einzelne Gaspartikel können jedoch im Signalverlauf nicht mehr identifiziert werden. Es wurde deshalb auf Mustererkennungsverfahren zurückgegriffen. Im Ergebnis liegt ein Meßverfahren vor, das mit einer begrenzten Genauigkeit (ca. 10 %) in der Lage ist, die Volumenstromdichten beider Phasen simultan zu ermitteln. Voraussetzung ist ein umfangreiches Training des Mustererkennungsverfahrens anhand von Stichproben, die aus dem gesamten angestrebten Meßbereich stammen müssen [1, 2] (überwachtes Lernen). Die Methode ist für verfahrenstechnische Anwendungen interessant, insbesondere wenn es sich um diagnostische Aufgaben handelt.

Ebenfalls erprobt wurde die Methode des unüberwachten Lernens (Clustering) von Durchschallungssignalen. In einem Koordinatensystem, gebildet aus den beiden Volumenstromdichten der strömenden Phasen, werden Gruppen ähnlicher Signalverläufe gebildet. Das führt zu einer Objektivierung der Unterscheidungskriterien zwischen verschiedenen Strömungsformen. Die Methode kann die Aufstellung von Strömungskarten unterstützen [2]. Neben den genannten Untersuchungen zur Mustererkennung werden in einem gerade begonnenen Projekt in Zusammenarbeit mit der TU Nishny Novgorod in Rußland verschiedene lokale Dichte- und Gasblasensensoren entwickelt und untersucht, die auf Ultraschall-Wellenleitern beruhen [3].

Nutzung von Positronenemittern

Die Anwendung von Positronenemittern bzw. Methoden der Positronen-Annihilations-Tomographie (PET) auf Strömungsprobleme bietet sich an, da das FZR ein medizinisches PET-Zentrum betreibt und daher die extrem teure Grundausstattung (Zyklotron, heiße Zellen, PET-Detektorsysteme) sehr kostengünstig mitgenutzt werden kann. Da die technischen Anwendungen von PET bisher recht begrenzt waren, wurde zunächst eine experimentelle Machbarkeitsstudie durchgeführt. Mittlerweile liegen zwei Anwendungen vor: (1) die Nutzung von festen Positronenquellen für die Dichtemessung in Medien kleiner Dichte ($10 - 100 \text{ kg/m}^3$) und (2) die Untersuchung der turbulenten Vermischung eines gelösten Spurstoffes in einer Blasenströmung.

Bei der Dichtemessung haben Positronen den Vorteil, daß sie wie Beta-Strahlung auch bei kleinen Dichten ausreichend stark geschwächt wird, dabei aber durch die Annihilation und die dabei stattfindende Bildung von harter Gamma-Strahlung auch außerhalb von Rohrleitungen oder Reaktoren effektiv nachgewiesen werden können [4]. Bei der Untersuchung der turbulenten Vermischung ermöglichen die PET-spezifischen Techniken der Kollimation mit Hilfe von Koinzidenzschaltungen eine hohe räumlich-zeitliche Auflösung der Transportvorgänge auch beim Einsatz geringer Aktivitäten im Bereich der Freigrenze [5].

Video-Bildverarbeitung

Hier geht es um die Blasengrößenverteilung in Elektrolysezellen und entsprechenden Modellanlagen. Auf kommerzieller Software (HEURISKO von AEON Verlag & Studio) aufbauend, wurde ein Verfahren entwickelt, das Blasen im μm -Bereich erkennen und auswerten kann. Es wurde zur Charakterisierung der Primärblasengröße in Chlor-Alkali-Elektrolysezellen und bei der als Modellreaktion dienenden katalytischen Zersetzung von Wasserstoffperoxid an Platin eingesetzt. Mit der Entwicklung einer zugeschnittenen Beleuchtungseinheit in Zusammenarbeit mit der Fa. Thalheim Spezial-Optik, Pulsnitz, wurde ein Beitrag zur Meßhardware geleistet.

2. Nadelförmige Leitfähigkeitssonden

Der Schwerpunkt der Arbeiten im FZR lag in der Entwicklung von Sonden für reaktortypische Bedingungen, d.h. für die hohen mechanischen und korrosiven Belastungen in Wasser bei Drücken bis zu 16 MPa und Temperaturen bis 350 °C (Kühlmittelparameter von Druckwasserreaktoren). Die meisten Isolationswerkstoffe (auch z.B. Quarzglas) sind hier nicht beständig. Die Sonden des FZR sind deshalb mit einer Aluminiumoxid-Sinterkeramik ausgestattet und erreichen derzeit Standzeiten von ca. 1000 Stunden.

Ein weiteres Problem bestand in den für die Versuchsanlagen typischen hohen elektrischen Störpegeln, die durch elektrisch beheizte Brennstabsimulatoren von mehreren 100 kW Leistung hervorgerufen werden. Meist kommt erschwerend dazu, daß eine Phasenanschnittsteuerung mit Thyristoren zur Leistungsregelung benutzt wird und die Brennelementsimulatoren direkt beheizt sind, d.h. der Strom durch die Hülle der Brennelementsimulatoren selbst fließt, die mit dem Strömungsmedium im Kontakt steht. Mit dem Meßsystem des FZR können unter solchen Bedingungen Gasgehaltsmessungen sicher durchgeführt werden, auch wenn das Meßmedium vollentsalztes Wasser mit der entsprechend kleinen elektrischen Leitfähigkeit ist.

Die Sonden wurden mittlerweile an mehreren Versuchsanlagen eingesetzt (s. z.B. [6-9]). In letzter Zeit kommt es immer mehr darauf an, Gasgehaltsverteilungen über den Strömungsquerschnitt zu erfassen. Mit Nadelsonden ist dies im Prinzip möglich, wenn mehrere Sonden im Querschnitt verteilt angeordnet werden. Dies wurde zur Ermittlung der Strömungsform bei der Kondensation in den schwach geneigten Rohren des Notkondensators für den zukünftigen Siedewasserreaktor SWR-1000 erstmals an einer Hochdruckanlage (NOKO im FZ Jülich, 7 MPa, 286 °C) realisiert. In einem Sondenfeld waren insgesamt 7 Einzelsonden annähernd gleichmäßig über den Rohrquerschnitt angeordnet (Bild 1). Durch eine leichte Drehung wurde außerdem erreicht, daß die Sonden eine gleichmäßige Staffelung über der Höhe bilden. Damit konnten sowohl Pfropfen und Schwälle als auch Gerinnehöhen bei einer Schichtströmung detektiert werden [9]. Insgesamt bestand jedoch zunehmend Bedarf an einer umfassenderen Ermittlung der momentanen Phasenverteilung im Strömungsquerschnitt. Aus diesem Grund wurde mit der Entwicklung des Gittersensors begonnen, der die Linie der Leitfähigkeitsmethoden fortsetzt.

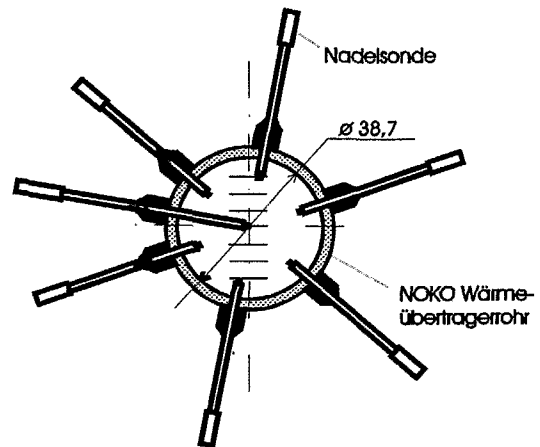


Bild 1 Sondenfeld zur Ermittlung der Strömungsform bei der Kondensation in leicht geneigten Rohren

3. Gittersensor zur Messung der Gasgehaltsverteilung

3.1 Meßprinzip

Der Gittersensor (vgl. [10]) basiert wie die Nadelsonden auf der Messung der momentanen örtlichen elektrischen Leitfähigkeit des Zweiphasengemischs. Er wird aus zwei Ebenen von Elektroden gebildet, die in Strömungsrichtung in einem kurzen Abstand hintereinander angeordnet sind (Bild 2). Der Winkel zwischen den Elektroden der beiden Ebenen beträgt 90°. Alle Elektroden sind gegeneinander und gegen die leitfähige Wandung des Sensors isoliert montiert. Die Elektroden der ersten Ebene (Senderebene) werden durch eine Multiplexschaltung zeitlich hintereinander mit kurzen Spannungsimpulsen versorgt. Dadurch tritt an jeder einzelnen Elektrode der zweiten Ebene (Empfängerebene) ein Strom auf, der zur mittleren Leitfähigkeit des Meßmediums in der Umgebung des Kreuzungspunkts der beiden Elektroden proportional ist. Aus dem Wert des empfangenen Stroms wird der lokale volumetrische Gasanteil ermittelt.

In der vereinfachten Darstellung nach Bild 2 geschieht die Ansteuerung der Elektroden der Senderebene durch das Schließen einer der Schalter S1 - S4. Die an den Empfängerelektroden auftretenden Ströme werden durch Operationsverstärker in Spannungen umgeformt und von Sample/Hold-Schaltungen abgetastet. Nach der AD-

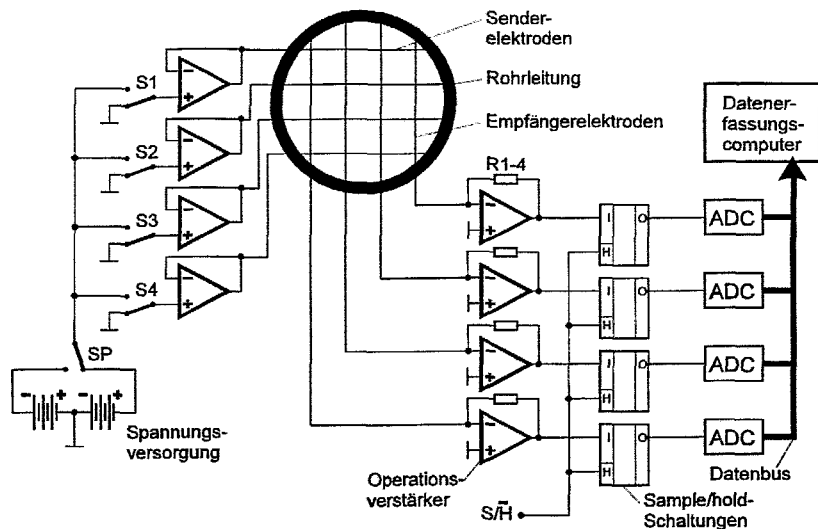


Bild 2 Prinzipdarstellung Gittersensor / Signalerfassung

Wandlung werden die Signale an einen Datenerfassungsrechner geleitet und dort für jede Empfängerelektrode individuell gespeichert. Diese Prozedur erfolgt nacheinander für jede der Sendeelektroden. Auf diese Weise wird die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit über dem Rohrleitungsquerschnitt zeilenweise ermittelt. Nachdem die letzte Sendeelektrode aktiviert wurde, liegt eine zweidimensionale Matrix von Spannungswerten vor, die die Leitfähigkeiten an allen Kreuzungspunkten der Elektroden von Sender- und Empfängerebene widerspiegelt.

Der Sensor wird kalibriert, indem die Rohrleitung nacheinander jeweils vollständig mit Flüssigkeit bzw. vollständig mit Gas gefüllt wird und die entsprechenden Leitfähigkeitsmatrizen abgespeichert werden. Während der eigentlichen Messung werden die Leitfähigkeitsmatrizen in volumetrische Gasanteile umgerechnet, indem man die einzelnen Meßwerte auf die Kalibrierwerte bezieht.

3.2 Unterdrückung von Übersprechen

Bei der Messung ist es unerlässlich, ein Übersprechen zwischen den nebeneinander angeordneten Elektroden sowohl der Sender- als auch der Empfängerebene zu unterbinden. In dem Moment, wo eine Elektrode der Senderebene mit dem Spannungsimpuls beaufschlagt wird, fließt neben dem Nutzsignal ein großer Teil des Stroms zu den benachbarten Sendeelektroden ab. Im allgemeinen wird dadurch an diesen Elektroden ein elektrisches Potential hervorgerufen, das zu einem unerwünschten Stromfluß von diesen Elektroden zu den Empfängerelektroden führt. Dieser Effekt führt zur Abnahme des Kontrasts, d.h. der örtlichen Auflösung quer zur Ausrichtung der Sendeelektroden. Daneben treten auch Ströme zwischen den parallel angeordneten Empfängerelektroden auf, wenn deren elektrischen Potentiale durch die von den Senderelektroden eintreffenden Ströme verändert werden, wodurch sich der Kontrast quer zur Ausrichtung der Empfängerelektroden verschlechtert.

Beide Effekte werden durch eine niederohmische Beschaltung sowohl der Sender- als auch der Empfängerelektroden verhindert. Während der Ansteuerung einer bestimmten Sendeelektrode wird das Potential an allen übrigen Senderelektroden

durch Treiberschaltungen mit niedriger Ausgangsimpedanz möglichst genau auf Nullpotential gehalten. Die Übersprechströme werden über die niedrige Ausgangsimpedanz der Treiberstufen abgeleitet. Durch niederohmische Meßverstärker (Impedanzwandler) an den Empfängerelektroden wird erreicht, daß das Potential der Empfängerelektroden ebenfalls stets Null ist. Im Ergebnis befinden sich alle Elektroden des Gittersensors mit Ausnahme der einen gerade angesteuerten Senderelektrode stets auf dem gleichen elektrischen Potential (Nullpotential), so daß keine Ströme auftreten können, die zu einer Verringerung des Kontrasts führen. Im Ergebnis ist die räumliche Auflösung des Meßverfahrens identisch mit der Dichte des Netzes von Kreuzungspunkten zwischen den Sender- und Empfängerelektroden.

3.3 Realisierung der Ansteuerung mit einer Wechselspannung

Bei allen Sensoren, die auf einer Leitfähigkeitsmessung beruhen wird der Betrieb mit einer gleichanteilfreien Wechselspannung bevorzugt, um Polarisations- und Elektrolyseeffekte an den Elektroden zu unterbinden. Häufig wird eine hochfrequente Wechselspannung für die Ansteuerung der Meßgeber benutzt. Empfangsseitig wird ein Demodulator mit nachgeschaltetem Tiefpaß zur Trägerunterdrückung eingesetzt. Die Betriebsfrequenz muß bei dieser Schaltung ein Vielfaches der angestrebten Meßfrequenz sein, wodurch mit Wechselspannungen im MHz-Bereich gearbeitet werden muß und die kapazitive Lasten im Sensor oft Schwierigkeiten bereiten.

Beim vorgestellten Gerät wird ein bipolarer symmetrischer Rechteckimpuls zur Ansteuerung verwendet. Die Empfängerströme werden durch Sample/Hold-Schaltungen verzögert abgetastet, nachdem der Sensor und die Meßverstärker eingeschwungen sind. Dadurch wird nur der Realteil des Stroms erfaßt, der durch das Meßmedium von der Sender- zur Empfängerelektrode gelangt. Die Imaginäranteile der Sensor- und Kabelimpedanz haben keinen Einfluß auf das Meßergebnis. Durch diese Art der Ansteuerung ist die Ansteuerfrequenz gleich der Meßfrequenz für die Abtastung des einzelnen Meßpunkts, die sich aus der Gesamtmeßfrequenz von 1024 Hz dividiert durch die Anzahl der Senderelektroden ergibt.

3.4 Leistungsparameter des Prototypgeräts

Die Signalerfassungseinheit des Prototypgeräts kann einen Sensor mit Ebenen je 16 Elektroden, d.h. mit 16 x 16 Meßpunkten ansteuern. Alternativ können auch 4 Sensoren mit 2 Ebenen zu je 8 Elektroden, d.h. mit 8 x 8 Meßpunkten gleichzeitig betrieben werden. Die Einheit ist mit vier Einkartenrechnern mit dem Prozessor MC 68340 (25 MHz Taktfrequenz, 4 MByte Speicher) bestückt. Je Rechner ist ein vierkanaliger ADC mit einer Umsetzzeit kleiner 10 µs bei einer Auflösung von 12 bit vorhanden, der die Analogsignale von je 4 der 16 Empfängerelektroden umsetzt. Die Daten werden in den Einkartenrechnern gepuffert, anschließend von einem PC übernommen und dort visualisiert bzw. abgespeichert. Die Kommunikation zwischen der Signalerfassungseinheit und dem Datenerfassungs-PC geschieht über serielle Schnittstellen. Es kann zwischen den Betriebsarten "on-line mode" und "off-line mode" gewählt werden. Die Meßfrequenz von 1024 Messungen pro Sekunde wird im off-line mode erreicht. Die Speicherkapazität der Einheit erlaubt die Aufnahme von Sequenzen von 60 s Dauer. Eine Bildrekonstruktion, die für tomographische Verfahren (z.B. in [11]) benötigt wird, ist aufgrund des geschilderten Signalerfassungsverfahrens nicht notwendig, d.h. die Meßdaten sind sofort nach der Messung für Auswertungen oder Visualisierungen verfügbar.

Bei on-line Betrieb werden etwa 20 Bilder pro Sekunde direkt während der Messung angezeigt.

3.5 Mechanischer Aufbau

Es wurden zwei Varianten entwickelt. Ein Drahtgittersensor verfügt über zwei Ebenen zu je 16 Drähten mit einem Durchmesser von 0,12 mm (Bild 4). Die Drähte sind gleichmäßig über den Durchmesser angeordnet. Der Abstand zwischen den beiden Ebenen beträgt 1,5 mm. In Rohrleitungen werden in den Eckbereichen einige Meßpunkte verdeckt. Speziell für die

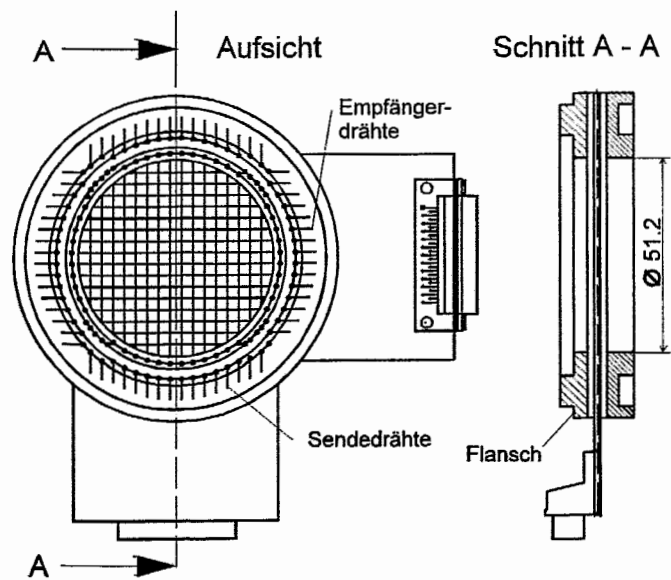


Bild 3 Drahtgittersensor NW50, 16x16 Meßpunkte

nachfolgend beschriebenen Druckstoßexperimente wurde ein zweiter Typ entwickelt: Der "schwere" Gittersensor mit stäbchenförmigen Elektroden aus nichtrostendem Stahl. Die

Stäbchen besitzen einen linsenförmigen Querschnitt, um den hydraulischen Widerstand und die Strömungsbeflussung klein zu halten (Bild 5). Es wurden sowohl Sensoren mit 8 x 8 Meßpunkten für NW50 als auch ein Sensor mit 16 x 16 Meßpunkten für NW100 hergestellt. Sie sind für 7 MPa und max. 150 °C ausgelegt.

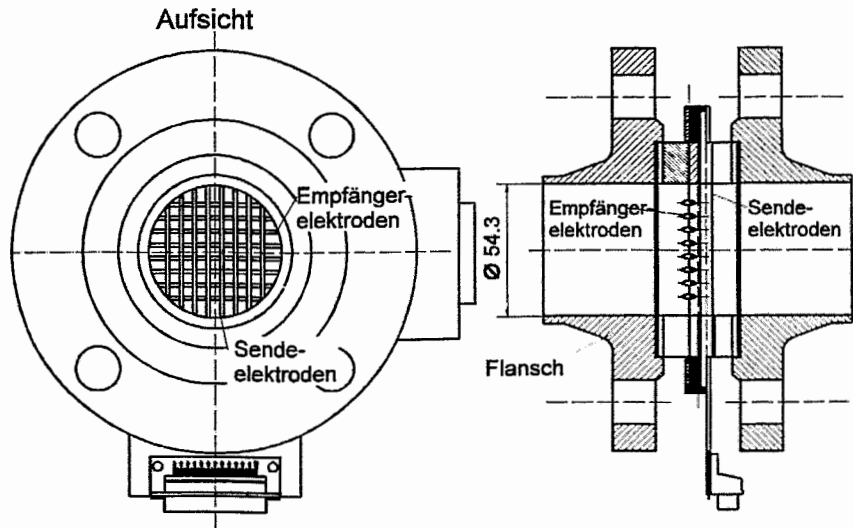


Bild 4 Gittersensor mit profilierten Elektrodenstäbchen für hohe Strömungsbelastung, NW50, 8 x 8 Meßpunkte

4. Anwendungsbeispiel: Druckstoßexperimente

Mit dem Sensors wurde die Kavitation hinter einer Schnellschlußklappe visualisiert, die sich am Anfang einer ca. 200 m langen Rohrleitung befindet. Die Tests fanden an einer Versuchsanlage des Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) in Oberhausen statt. Die Klappe wurde im Intervall von 0 bis 200 ms nach Start der Messung geschlossen. Ein "schwerer" Sensor mit 16 x 16 Meßpunkten befand sich 0,2 m hinter dem Ventil (Bild 5). Die aufgenommenen Daten können als digitaler Zeitlupenfilm auf dem Display des Datenerfassungsrechners abgespielt

werden. Für die graphische Darstellung wurde die axiale Gasgehaltsverteilung als Funktion der Zeit gewählt, die hierzu aus den Meßdaten abgeleitet wurde. In Bild 5 ist das Ergebnis eines Versuchs mit 4 m/s Wassergeschwindigkeit dargestellt. Bei $t=100$ ms, d.h. bereits zu einem Zeitpunkt, da der Schließvorgang erst zu etwa 50 % abgelaufen ist, setzt die Verdampfung durch Kavitation ein. Im weiteren Verlauf kommt es zur Phasenseparation und es bildet sich eine Flüssigkeitsschicht heraus. Einzelne, kleinere Gasblasen werden nur am Anfang der Kavitation beobachtet.

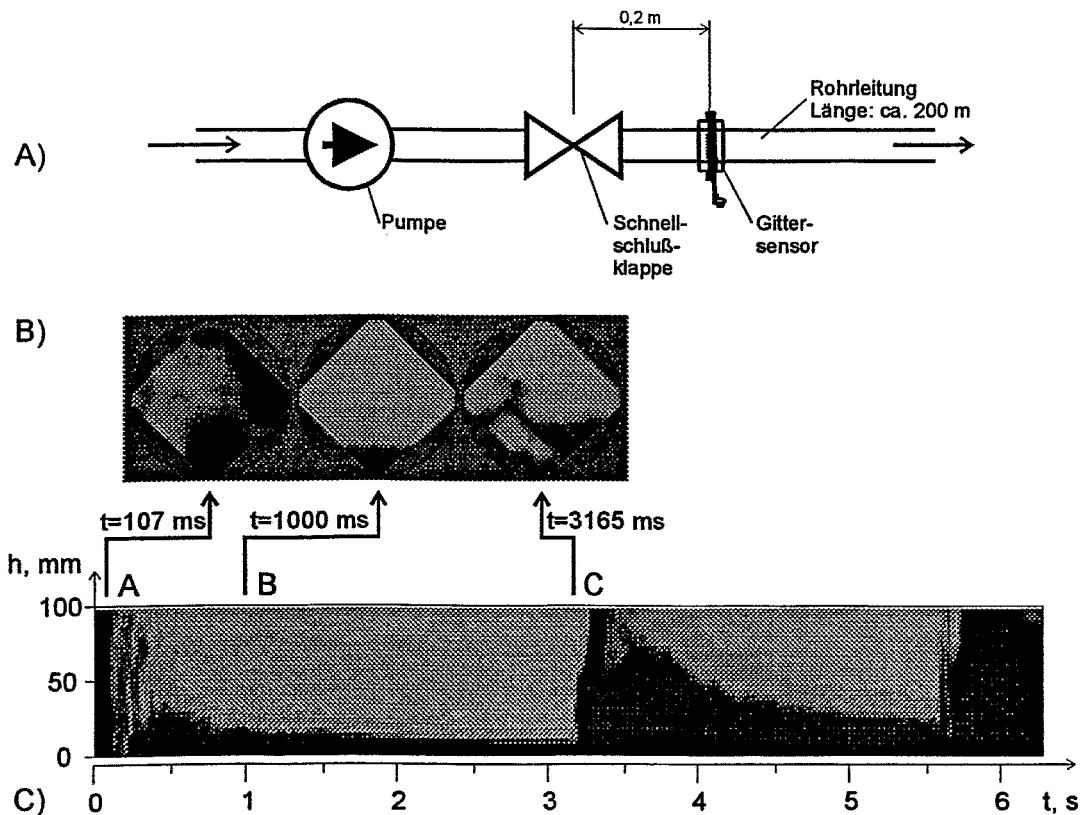


Bild 5 Visualisierung der Kavitation hinter einer schnellschließenden Klappe (Wasser, $v_0 = 4$ m/s, 20 °C, NW100)

A - Anordnung von Klappe und Sensor, B - ausgewählte Momentaufnahmen der Dampfgehaltsverteilung, C - Zeitverlauf der Dampfgehaltsverteilung über die Höhe

Nachdem die Kavitationsblase ihre maximale Ausdehnung erreicht hat, beginnt der Kondensationsvorgang. Dabei bewegt sich ein Flüssigkeitsschwall auf die nun geschlossene Absperrarmatur zu. Kurz nachdem der Schwall den Sensor durchlaufen hat, prallt die Flüssigkeitssäule auf die geschlossene Klappe und es tritt ein Wasserhammer mit einer Druckspitze von 4-5 MPa auf. In diesem Moment ($t=3,3$ s) ist der Sensorquerschnitt vollständig mit Wasser gefüllt. Die Reflexion der Druckwelle führt zur erneuten Bildung einer Kavitationsblase, die jedoch nicht mehr die Ausdehnung der ersten erreicht. Dieser Prozeß wiederholt sich einige Male. Die zweidimensionalen Gasgehaltsverteilungen offenbaren weitere Details. Es ist z.B. zu erkennen, daß der Verdampfungsvorgang auf der linken Seite zuerst einsetzt, was auf die Exzentrizität der Schnellschlußklappe zurückzuführen ist. Die Ergebnisse der Druckstoßexperimente wurden in [12] im Detail publiziert.

Literatur

- [1] H.-M. Prasser, F. Hensel, P. Schütz: "Ultrasonic two-phase flow measurements based on pattern recognition techniques", Proceedings of the XIII IMEKO world congress, Torino, 5-9 September 1994, vol. 2, pp. 1112-1117.
- [2] 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 BMBF-Vorhaben 1500967, FZR-203, November 1997.
- [3] V. I. Melnikov, B. I. Nigmatulin: The new two-phase control devices in LWR equipment based on ultrasonic and WAT-technology. Nuclear Engineering and Design. 149 (1994) pp. 349-355.
- [4] F. Hensel: "Studies of Liquid-Gaseous Two-Phase Systems by Positron Emitting Radiotracers", Presentation held at the 3rd Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurements and Applications IRRMA96 October 6-9, 1996, Raleigh, USA, Conference Program & Abstracts ISBN 0-89448-615-2; to be published in Applied Radiation and Isotopes O228, Proceedings of IRRMA 1996, USA, 6-9 October 1996
- [5] F. Hensel, H.-M. Prasser: "Studies of Bubbly Flows by Positron Emitting Radiotracers", held on: Frontiers in Industrial Process Tomography II, Delft, The Netherlands, April 9-12, 1997, proceedings pp. 47-51.
- [6] H.-M. Prasser, R. Lotzmann, G. Uhlmann, L. Maroti, P. Windberg: "Beobachtung des Loop-Seal-Clearings in der Integralanlage PMK-NVH des KFKI Budapest mit Nadelsonden", Kernenergie 34 (1991) 1, S. 21-24.
- [7] A. P. Proshutinsky, M. P. Gashenko, I. A. Lipatov, E. V. Stolyarov, B. I. Nigmatulin, V. A. Gashenko, I. V. Elkin, H.-M. Prasser, W. Zippe: "Experimental Investigations of Accidental Thermalhydraulic Processes caused by Circuit Depressurization at the ISB-VVER Integral Test Facility", Symp. on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Rome, 1995, Proc. Vol. 1, pp. 537-544.
- [8] Gy. Ezsöl, A. Guba, L. Pernecky, E. Krepper, H.-M. Prasser, F. Schäfer: Simulation of a Small Cold-Leg-Break Experiment at the PMK-2 Test Facility Using the RELAP5 and ATHLET Codes, Nucl. Technology 118 (1997) 2, pp. 162-174.
- [9] A. Schaffrath, H.-M. Prasser, E. F. Hicken, H. Jaegers: Der passive Notkondensator des SWR-1000, Test und Berechnung, Atomwirtschaft-Atomtechnik 42 (1997) Heft 11, S. 697-700.
- [10] H.-M. Prasser, A. Böttger, J. Zschau: A New Wire-Mesh Tomograph for Gas-Liquid Flows, held on: Frontiers in Industrial Process Tomography II, Delft, The Netherlands, April 9-12, 1997, proceedings pp. 109-112.
- [11] N. Reinecke, M. Boddem, G. Petritsch, D. Mewes: Tomographisches Messen der relativen Phasenanteile in zweiphasigen Strömungen fluider Phasen, Chem. Ing. Tech. 68 (1996) 11, S. 1404-1412.
- [12] A. Dudlik, S. Schlüter, H.-M. Prasser: Transiente Strömungsvorgänge in Rohrleitungen, Messung und Berechnung von Druckstößen und Kavitationsschlägen in Rohrleitungen, Monitoring und Diagnostik in energietechnischen Anlagen, Tagung Braunschweig 8.-9.10.1997, VDI-Bericht Nr. 1359, S. 353-367, (ISDN 3-18-091359-2).

ULTRASCHALL-DOPPLER-MESSTECHNIK ZUR DIAGNOSE INSTATIONÄRER MEHRPHASEN-STRÖMUNGSVORGÄNGE

Olaf Specht, Otto Fiedler
Universität Rostock, FB Elektrotechnik

Olaf Skerl
Bad Doberan

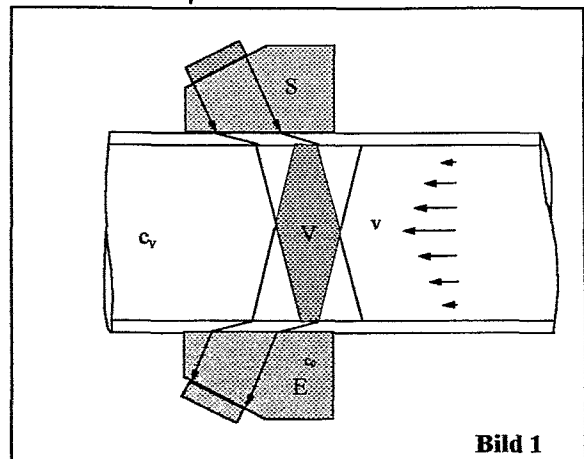
1. Einleitung

In vielen Bereichen der Technik und in der Industrie besteht zunehmend die Forderung nach einer flexiblen, nichtinvasiven Meßtechnik für Strömungsgeschwindigkeiten und Durchflüsse. Die Ultraschall-Clamp-On-Meßtechnik kann diese Anforderungen erfüllen und wird in wachsendem Umfang eingesetzt. Die Anwendung dieser Technik setzt nur die akustische Transparenz der Rohrwand voraus, was für die meisten Materialien wie Metalle, Kunststoffe und Glas der Fall ist. Bei überwiegend einphasigen Fluiden wird das Ultraschall-Laufzeit-Verfahren gegenüber dem Doppler-Verfahren bevorzugt. Das Ultraschall-Doppler-Verfahren ist nach seinem Wirkprinzip auf mehrphasige Fluide angewiesen, denn es nutzt die Frequenzverschiebung der an den Phasengrenzen rückgestreuten Schallwellen als Meßgröße für die Strömungsgeschwindigkeit [1].

2. Meßprinzip der CW-Ultraschall-Doppler-Durchflußmessung

Das Bild 1 zeigt den typischen Aufbau einer Meßanordnung zur Durchflußmessung mit Hilfe von Ultraschallwellen nach dem Doppler-Prinzip. Diese Anordnung arbeitet nach dem Clamp-On-Verfahren. Das heißt, die Ultraschallschwinger (Sender S und Empfänger E) werden auf der Oberfläche der Rohrwand positioniert.

Bei der Ultraschall-Doppler-Durchflußmessung werden von einem Schallwandler (Sender S) ständig Ultraschallwellen bekannter Frequenz unter einem bestimmten Winkel α in das fließende Medium eingestrahlt. Feststoffteilchen, kleinste Luftblasen oder Inhomogenitäten wie zum Beispiel kleine Wirbel, die sich mit der Strömung mitbewegen, wirken als Streuteilchen für die Ultraschallwellen und streuen diese unter anderem auch in die Richtung des Empfangsschallwandlers E unter einem Winkel β . Am Empfänger E werden die Rückstreuungssignale aller Streuteilchen summiert, die sich zur gleichen Zeit im Meßvolumen V befinden. Da sich die Teilchen gegenüber dem Ultraschallsender wie auch gegenüber dem Empfänger bewegen, erfahren die auf dem Empfangsschallwandler registrierten Schallwellen eine zweifache Frequenzverschiebung Δf nach dem Doppler-Effekt gegenüber der Sendefrequenz f_s . Unter der Voraussetzung, daß die Fließgeschwindigkeit v sehr viel kleiner ist als die Schallgeschwindigkeit c im Fluid beschreibt die Gleichung 1 diesen Doppler-Effekt:



Da sich die Teilchen gegenüber dem Ultraschallsender wie auch gegenüber dem Empfänger bewegen, erfahren die auf dem Empfangsschallwandler registrierten Schallwellen eine zweifache Frequenzverschiebung Δf nach dem Doppler-Effekt gegenüber der Sendefrequenz f_s . Unter der Voraussetzung, daß die Fließgeschwindigkeit v sehr viel kleiner ist als die Schallgeschwindigkeit c im Fluid beschreibt die Gleichung 1 diesen Doppler-Effekt:

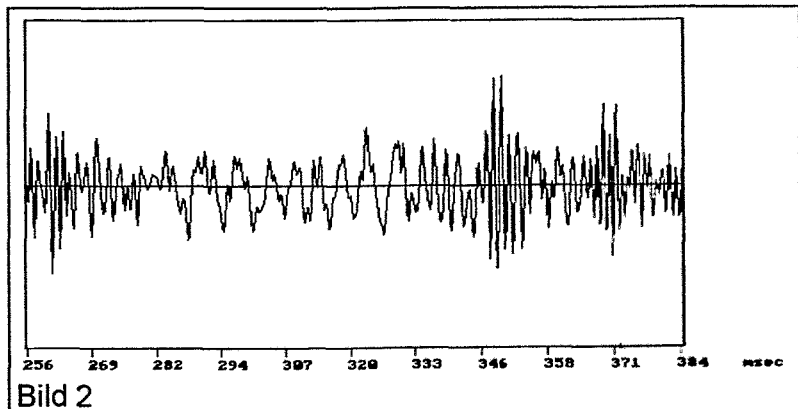
$$\Delta f = f_s \frac{v}{c} (\cos \alpha + \cos \beta) \quad (1)$$

Die Proportionalität zwischen der Frequenzverschiebung Δf und der Geschwindigkeit v ermöglicht die direkte Geschwindigkeitsmessung mit Hilfe des Doppler-Verfahrens. Als problematisch erweist sich in der Praxis die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit c und der Strahlwinkel α und β , da diese Größen auch stark temperaturabhängig sind.

Die Ausbildung eines Strömungsprofils in geschlossenen, durchflossenen Gefäßen bedingt, daß sich Streuteilchen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durch das Meßvolumen hindurchbewegen. Das Doppler-Signal hat also ein dem Geschwindigkeitsprofil im Meßvolumen proportionales Frequenzspektrum. Für die Bestimmung der Durchflußmenge wird meist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit entsprechend der Schwerpunktsfrequenz des Doppler-Spektrums gesucht. Erfolgreiche Doppler-Messungen setzen somit die genaue Bestimmung des Doppler-Spektrums für jede Strömungscharakteristik und geeignete Algorithmen für die Berechnung des spektralen Schwerpunktes voraus. Wie im weiteren gezeigt wird, gestaltet sich die Bestimmung des Doppler-Spektrums bei dynamischen Strömungsänderungen besonders schwierig.

2. Charakteristik der Doppler-Signale

Für die Auswahl geeigneter Signalverarbeitungsalgorithmen muß man zunächst die Eigenschaften der zu analysierenden Signale und ihre Herkunft genauer untersuchen. Betrachtet man das Doppler-Signal eines einzelnen Streuteilchen, so hat man eine Siniode meist konstanter Frequenz zu analysieren. Bei höheren Teilchenkonzentrationen summieren sich die Doppler-Sinioden der sich gleichzeitig durch das Meßvolumen hindurch-



bewegenden Streuteilchen. Die unterschiedlichen Amplituden, Frequenzen und statistisch verteilten Phasenlagen dieser Sinioden bilden ein Summensignal, das eine gewisse Ähnlichkeit mit Rauschen hat (siehe Bild 2), aber instationär ist. Die im Doppler-Signal häufig auftretenden Phasensprünge sind eine weitere Fehlerquelle bei der Spektralanalyse.

3. Spektralanalysemethoden für nichtstationäre Signale

Bei sich dynamisch ändernden Durchflüssen, wie zum Beispiel bei pulsierenden Strömungen, ändern sich die Doppler-Spektren zeitlich entsprechend der Änderungen der Fließgeschwindigkeit. Die Analyse von zeitvarianten Signalen mit klassischen Spektralanalysemethoden ist problematisch. So sucht man nach Zeit-Frequenz-Verteilungen mit möglichst hoher Auflösung in der Zeit-Frequenz-Ebene.

Das am häufigsten angewendete Spektralanalyseverfahren ist die Fouriertransformation (FT) mit ihrer Implementation in der digitalen Signalverarbeitung als FFT:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2).$$

Die zeitliche Begrenzung technischer Signale $s(t)$ bedingt die Multiplikation dieser mit einer Fensterfunktion $h(t)$. Im Frequenzbereich führt das zu der Faltung des Signalspektrums mit dem Spektrum der Fensterfunktion. Treten innerhalb des Analysefensters $h(t)$ zeitliche Änderungen der spektralen Zusammensetzung des zu analysierenden Signals auf, so werden diese Änderungen im Spektrum summiert und eine zeitliche Zuordnung der einzelnen Spektralanteile ist nicht mehr möglich.

Für die Analyse dynamischer Strömungsvorgänge verwendet man daher gegenwärtig das Spektrogramm, eine auf der Kurzzeit-FFT basierende Zeit-Frequenz-Verteilung:

$$S(t, \omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) * h(\tau - t) e^{-j\omega \tau} d\tau \right|^2 \quad (3).$$

Da auch hier in jedem einzelnen Spektrum alle Frequenzanteile und deren Veränderungen, die im Analysezeitfenster $h(\tau - t)$ auftreten, summiert werden, muß dieses Fenster zum Erreichen einer hohen Zeitauflösung möglichst kurz gewählt werden, was wiederum eine schlechte Frequenzauflösung bedingt. Bei der Anwendung des Spektrogramms muß man also immer einen Kompromiß zwischen der Zeit- und der Frequenzauflösung finden.

Die Wigner-Verteilung dagegen ist eine Zeit-Frequenz-Verteilung, bei der man die zeitliche und die Frequenzauflösung in einem weiten Bereich unabhängig voneinander wählen kann. Sie stellt sich als die FT einer Produktfunktion aus dem Zeitsignal dar:

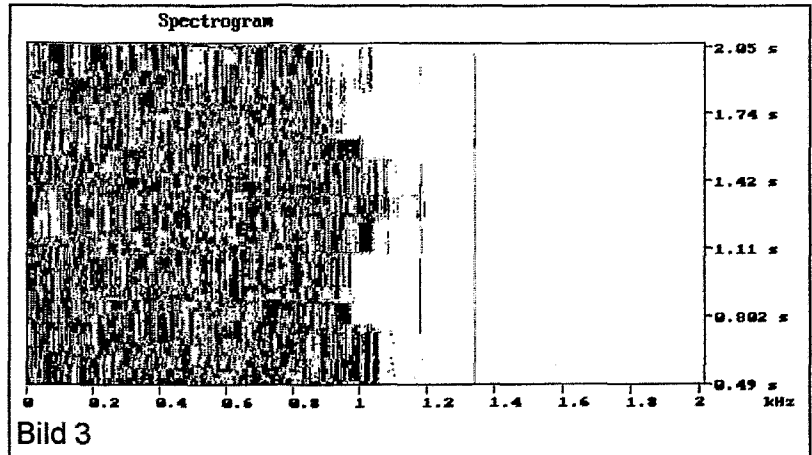
$$W(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t + \tau/2) s^*(t - \tau/2) e^{-j\omega \tau} d\tau \quad (4).$$

Meist wird diese Verteilung als Wigner-Ville-Spektrum implementiert, bei der man das analytische Signal nutzt [2]. Die Wigner-Verteilung kann man als ein Leistungsdichtespektrum interpretieren, da sie viele Eigenschaften eines solchen aufweist, sie ist es aber strenggenommen nicht. Weitergehende Informationen kann man in [2], [3] und [4] nachlesen.

4. Leistungsvergleich zwischen Spektrogramm und Wigner-Verteilung am Beispiel einer pulsierenden Strömung

Ein gutes Beispiel für eine dynamische Strömung sind die Pulsationen einer Rollenpumpe. Sie eignen sich besonders gut für den Leistungsvergleich der Zeit-Frequenz-Verteilungen, da zu Beginn der Pumpaktion, wenn die Rolle den Schlauch zusammendrückt, ein schneller Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit bis zu einem Maximalwert zu verzeichnen ist, der dann während des Abrollens am Schlauch gehalten wird. In der Pause zwischen dem Abrollen der ersten Rolle und dem Andrücken der zweiten Rolle geht die Fließgeschwindigkeit fast auf Null zurück.

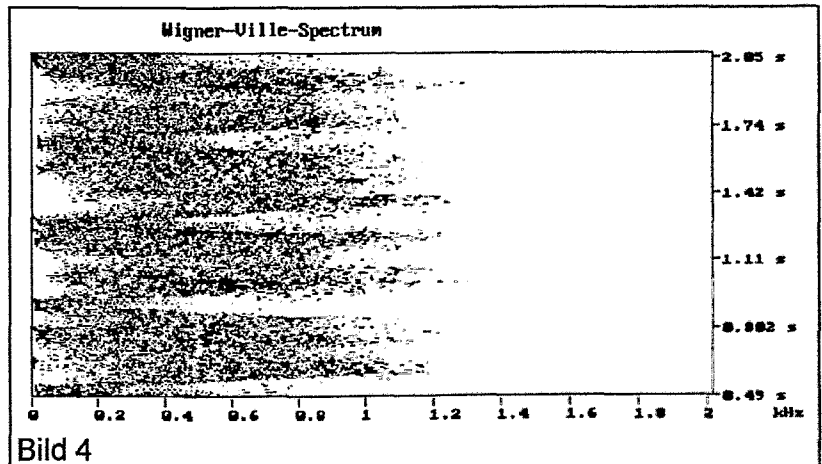
Das oben angegebene Bild 2 ist ein Ausschnitt aus dem Dopplersignal



der pulsierenden Strömung einer Rollenpumpe. Das Bild 3 zeigt das Spektrogramm eines 8 Kbyte langen Signalausschnitts mit einer Auflösung von 512 Frequenzklassen und 256 Zeitscheiben. Für den selben Signalausschnitt wurde das Wigner-

Ville-Spektrum in der gleichen Auflösung berechnet (Bild 4). Deutlich ist die weit bessere Zeitauflösung der Wigner-Verteilung zu erkennen.

Außerdem wirkt sich bei diesen Analysen ein im Signal vorhandener Gleichanteil im Wigner-Ville-Spektrum bei weitem nicht so störend aus wie im Spektrogramm. Mit



dem Spektrogramm ist eine genauere Untersuchung der Laufcharakteristik der Rollenpumpe nicht möglich. Im Wigner-Ville-Spektrum kann man dagegen erkennen, daß die beiden Rollen der Pumpe unterschiedlich gut über den Schlauch abrollen.

Das Bild 5 stellt die zeitlichen Verläufe der spektralen Schwerpunkte des Spektrogramms und des Wigner-Ville-Spektrums dar. In diesen Darstellungen ist die Ordinate die Zeitachse, und an der Abszisse ist die Schwerpunktsfrequenz abgetragen, die bis auf einen Proportionalitätsfaktor der mittleren Strömungsgeschwindigkeit entspricht. Auch hier ist die höhere Zeitauflösung der Wigner-Verteilung an der stärker schwankenden Linie zu erkennen. Im ersten Strömungspuls sieht man nach dem steilen Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit einen langsameren Abfall dieser von drei kleineren Pulsationen überlagert. Dieses Verhalten zeigt, daß diese Rolle den Schlauch zu Beginn der Rollbewegung gut abschließt, aber im Laufe der Bewegung den Andruck verringert und aufgrund der drei kleineren Pulsationen unruhig zu

laufen scheint. Im zweiten Strömungspuls, der der zweiten Rolle zugeordnet werden kann, erkennt man eine nach dem steilen Anstieg gleichbleibende Strömungsgeschwindigkeit auch hier mit leichten Pulsationen durch eine leichte Unwucht der Rolle. Der dritte Puls wird wieder von der ersten Rolle bewirkt und zeigt ihr typisches Rollverhalten, wie auch der vierte Puls wieder der Pumpcharakteristik der zweiten Rolle widerspiegelt.

Das stärker in der Zeitrichtung mittelnde Spektrogramm bewirkt eine entsprechend geglättete Schwerpunktslinie, an der schnelle Strömungsänderungen nicht mehr zu analysieren sind. Darüber hinaus treten durch die mangelhafte Zeitauflösung Fehler bei der zeitlichen Zuordnung der Pumpvorgänge auf. Die Charakteristik der Strömungspulse ist so stark durch das Signalanalyseverfahren verfälscht, daß eine Analyse der Rollvorgänge unmöglich ist.

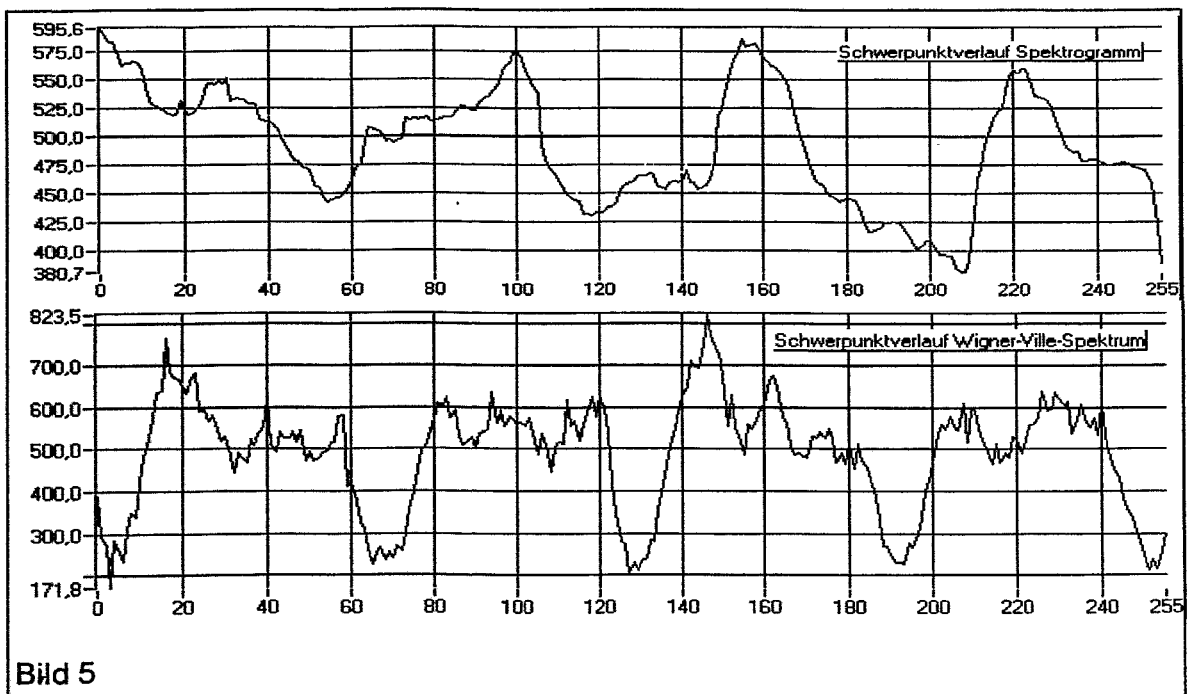


Bild 5

Unsere Untersuchungen verschiedener numerischer Integrationsalgorithmen (Trapez, Simpson, Bode) zur Schwerpunktbestimmung zeigten, daß die Abweichungen untereinander und zur einfachen Rechteckregel unter 0.5% liegen sowohl für die lokalen als auch für den globalen spektralen Schwerpunkt, aus dem man den mittleren Durchfluß berechnen kann. Die Abweichungen zwischen den globalen Momenten der Wigner-Verteilung und des Spektrogramms können somit auf die Fehler im Spektrogramm aufgrund der Kürze der Analysefensters und der unzureichenden Zeitauflösung zurückgeführt werden. Für die Untersuchung dynamischer Strömungen stellt sich die Wigner-Ville-Verteilung trotz ihres beträchtlich höheren Rechenaufwandes als bessere Spektralanalysemethode heraus.

5. Literatur

- [1] Fiedler O.
Strömungs- und Durchflußmeßtechnik
Oldenbourg-Verlag, München, Wien 1992

- [2] Yen N.
Time and frequency representation of acoustic signals by means of the
Wigner distribution function: Implementation and interpretation
JASA 81 (1986), Nr. 6, S. 1841 - 1850

- [3] Claasen T.A.C.M., Mecklenbräuker W.F.G.
The Wigner distribution - a tool for time-frequency signal analysis
Philips Journ. of Res., 35 (1980)
Part I: Nr. 3, S. 217 - 250
Part II: Nr. 4/5, S. 276 - 300
Part III: Nr. 6, S. 372 - 389

- [4] Skerl O., Schmidt W., Specht O.
Wigner-Verteilung als Werkzeug zur Zeit-
Frequenz-Analyse nichtstationärer Signale
Technisches Messen 61, 1994, Heft 1, S. 7-15

Kontaktadresse:
Universität Rostock
Fachbereich Elektrotechnik
Dipl.-Ing. Olaf Specht
Albert-Einstein-Str.2
18059 Rostock

e-mail: olaf.specht@e1technik.uni-rostock.de
Tel.-Nr.: 0381/4405 366

ANWENDUNG EINER NEUARTIGEN ULTRASCHALLMESSTECHNIK ZUR BESTIMMUNG VON STRÖMUNGSREGIMEN UND FÜLLSTÄN- DEN IN WASSER/DAMPF-SYSTEMEN

S. Alt, W. Lischke, V.I.Melnikov

*Hochschule für Technik, Wirtschaft und Sozialwesen Zittau/Görlitz (FH)
Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik, IPM e.V.
Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau, Deutschland
Tel :++49/3583/611544
Fax:++49/3583/611847*

*Technische Universität Nizhni Novgorod
Minina-Straße 24
603600, GSP-41 Nizhny Novgorod, Rußland
Fax: 8312369475*

1 Einleitung

Der Volumendampfgehalt ist eine charakteristische Größe für die Analyse von Zweiphasenströmungen in Rohrleitungen von Wasser-Dampf-Systemen. Die Kenntnis des Volumendampfgehaltes, der Phasenverteilung und der resultierenden Strömungsform in einem Zweiphasengemisch ist notwendig, um daraus Informationen über die Größe der Phasengrenzflächen ableiten zu können. Die Phasengrenzfläche ist wiederum ein bestimmendes Kriterium zur Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Phasen, wie den Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch [1]. Um mögliche Strömungsformen in einer horizontalen Rohrleitung bestimmen zu können, werden in der Praxis Strömungsregimearten verwendet. Die dichtekorrelierte Leerrohrgeschwindigkeit von Dampf (Wallis-Parameter) wird beispielsweise bei der Strömungsregimekarte nach Tandon [2], die für Kondensationsbedingungen in horizontalen Rohrleitungen erarbeitet wurde, als Ordinate über einen relativen, auf den Volumendampfgehalt bezogenen Volumenwassergehalt aufgetragen.

Für die Bestimmung des Volumendampfgehaltes gibt es die unterschiedlichsten Meßsysteme. Herkömmliche Ultraschall-(US)meßsysteme zur Bestimmung eines Höhenstandes basieren im wesentlichen auf dem Impuls-Echo-Verfahren. Dabei wird die Zeit gemessen, die vergeht, bis ein von einer Grenzfläche reflektierter US-Impuls wieder an seinen Ausgangspunkt zurückkehrt. Für dieses Verfahren werden sogenannte US-Sende-Empfangsköpfe eingesetzt. Die Bestimmung des Wasserhöhenstandes in engquerschnittigen horizontalen Rohren bei gesättigten Wasser-Dampf-Strömungen, wie z.B. in liegenden Wärmeübertragern, stellt dabei ein besonderes Problem dar. Die Schwierigkeiten bei dem Einsatz von optischen, kapazitiven, elektrischen, Durchstrahlungs- oder den klassischen US-Meßsystemen unter diesen Bedingungen bestehen in:

- dem großen Verhältnis von Wandstärkendichte zur Fluidichte,
- dem geringen Strömungsquerschnitt,
- den hohen Druck- und Temperaturbelastungen im Rohr,
- den geringen Umgebungsabmessungen im Rohrbündel von Wärmeübertragern und
- den hohen Druck- und Temperaturbelastungen außerhalb des Rohres.

Der Test des Einsatzes der klassischen Impuls-Echo-Methode für die Bedingungen einer druck- und temperaturbelasteten Wasser-Dampf-Zweiphasenströmung in engquerschnittigen horizontalen Rohren zeigte einerseits, daß für den Einsatz eines solchen Verfahrens der US-Kopf direkt am Fluid anliegen muß, und andererseits, die Werkstoffe der piezoelektrischen Bauelemente sowie der Vorlaufstrecke (z.B. Vespel) nur eine sehr geringe Standfestigkeit gegen die Wasser-Dampf-Strömung aufwiesen [3].

Die erfolgreiche Anwendung einer neuartigen Ultraschalltechnologie, die an der Technischen Universität Nizhni Novgorod entwickelt und in Rußland patentiert wurde, basiert dagegen auf der Verlagerung des Ultraschallkopfes (S-E) aus der direkten aggressiven Umgebung des Rohres und auf der Kopplung mit einer schallsensitiven Sonde aus Edelstahl innerhalb der Rohrleitung.

2 Physikalische Grundlagen und Methode der neuen Ultraschalltechnologie

Für die Füllstandsbestimmung in einem horizontalen Rohr wurde an der TU Nizhni Novgorod die Methode der Messung der akustischen Impedanz an einem Ultraschallwellenleiter mit Hilfe gekrümmter Wellen entwickelt. Das Meßverfahren nutzt den Effekt, daß die Trägheit der flüssigen Phase einen Einfluß auf die Ausbreitung der akustischen Impulse in einem Wellenleiter ausübt.

Der Einfluß der Flüssigkeit auf die Ausbreitung von gekrümmten Wellen in einem Wellenleiter, der in diese Flüssigkeit eingetaucht ist, kann in zwei Fälle unterschieden werden [4]:

1. Wenn die Geschwindigkeit der gekrümmten Wellen größer als die Schallgeschwindigkeit der flüssigen Phase ist, so wirkt die Flüssigkeit als Dämpfungsglied und die Amplitude der Wellen verringert sich nach einer Exponentialfunktion.
2. Wenn die Geschwindigkeit der Wellen kleiner als die Schallgeschwindigkeit der Flüssigkeit ist, wirkt die Flüssigkeit als Trägheitsglied, wodurch sich die Geschwindigkeit der Wellen verringert.

Für die praktische Realisierung einer Füllstandsmessung nach dem ersten oder zweiten Prinzip ist es notwendig, den geeigneten Sensordurchmesser des Wellenleiters und die US-Frequenz auszuwählen. Im Bereich hoher Frequenzen f und großer Sensordurchmesser d ändert sich die Geschwindigkeit der gekrümmten Wellen nullter Ordnung praktisch kaum und die Dämpfungskonstante γ bei Eintauchen des Sensors in Flüssigkeit berechnet sich nach

$$\gamma = \frac{\rho_T c_T}{\rho d \sqrt{(2 \pi f d c_{CT})}} \quad (1)$$

mit ρ_T - Dichte der Flüssigkeit,
 c_T - Schallgeschwindigkeit in der Flüssigkeit,

- ρ - Dichte des Wellenleitermaterials,
 c_{CT} - Geschwindigkeit der Longitudinalwellen.

Für niedrige Frequenzen und kleine Durchmesser wird die Geschwindigkeit der gekrümmten Wellen $c_{gek \Gamma}$ wie folgt bestimmt.

$$c_{gek \Gamma} = \sqrt{\frac{\pi f d c_{CT}}{8}} \quad (2)$$

Unter Berücksichtigung des Parameterbereiches der Experimente ($p \leq 8 \text{ MPa}$) ist bei der Wahl von $f \cdot d \cdot c_{gek \Gamma} \leq 8 \cdot 10^5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ die Geschwindigkeit der gekrümmten Wellen kleiner als die Schallgeschwindigkeit im Wasser. Damit bestimmt die Trägheit der flüssigen Phase die Ausbreitung der Wellen. Die Schallgeschwindigkeit im Sensor wird in diesem Fall mit folgender Berechnungsvorschrift bestimmt.

$$c = \left(1 - \frac{\rho_T}{2 \rho}\right) c_{gek \Gamma} \quad (3)$$

Für die Randbedingung der Füllstandsmessung in einem Rohr mit geringem Strömungsquerschnitt wurde die Variante 2 zur Umsetzung der Meßaufgabe herangezogen. Die Ermittlung der Schallgeschwindigkeit im Sensor nach (3) bietet gegenüber der Variante 1 zwei wesentliche Vorteile:

1. Es können sehr kleine Sensoren eingesetzt werden.
2. Die zu messende Schallgeschwindigkeit hängt nur von der Dichte des Fluids und nicht von der Schallgeschwindigkeit des Fluids ab.

Der Einfluß der Temperatur auf das Wellenleitermaterial der Sonde wird durch eine Kalibrierung der Meßsonde berücksichtigt.

3 Konstruktion des Gebers und Funktionsprinzip

Der gesamte Geber (Bild 1) besteht aus:

- 1 - einem Sensor (gezogener Ring),
- 2 - einem Konus zur Abdichtung zwischen Primärseite und Wellenleiter,
- 3 - einer Verschraubung zur Abdichtung zwischen Primär- und Sekundärseite,
- 4 - einem Schutzrohr,
- 5 - einem Wellenleiter der Longitudinalwellen transportieren kann,
- 6 - temperaturbeständige Distanzscheiben,
- 7 - einer Verschraubung zur Abdichtung zwischen Sekundärseite und Umgebung,
- 8 - dem US-SE-Kopf-Gehäuse,
- 9 - dem Piezoelement,
- 10 - dem Transformator,

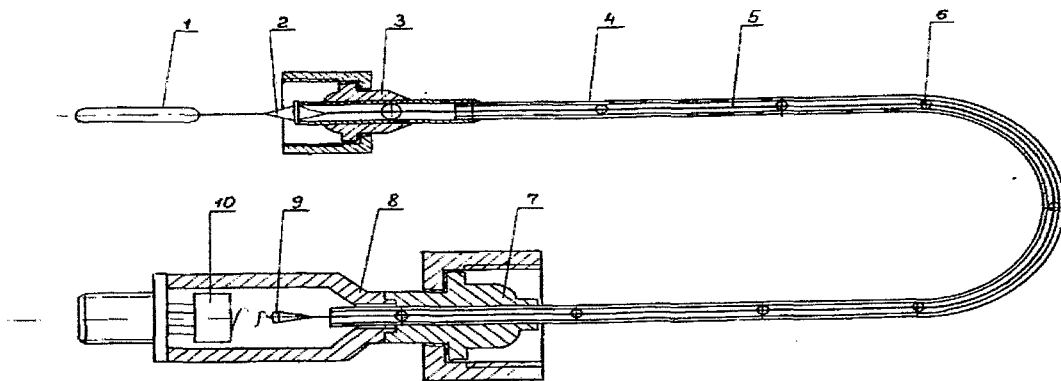


Bild 1 Gesamtaufbau des US-Höhenstandsdetektors

Der Sensor (Bild 1, Pos. 1) besteht aus einem Edelstahl draht mit einem Durchmesser von 0,4 mm, an dem der Sondenkopf in Form einer Ellipse (Länge 20 mm, Breite 5 mm, Materialstärke 0,4 mm) angeschweißt wurde. Der Wellenleiter (Bild 1, Pos. 5) wurde aus Edelstahl draht mit einem Durchmesser von 0,8 mm hergestellt, der sich in einem Hüllrohr (6x1mm) befindet und mit Hilfe von wärmebeständigen Distanzscheiben geführt wird. Der elektroakustische Wandler besteht aus einer Piezokeramik auf der Basis von Zirkonium, Titan und Blei, wie er auch bei üblichen US-SE-Köpfen eingesetzt wird. Mittels eines doppelten Konusses wurde der Geber primärseitig abgedichtet. Die Dichtung zwischen Primär- und Sekundärseite als auch die Dichtung zwischen Sekundärseite und Umgebung wurden mittels Verschraubungen realisiert. An der Anlage HORUS-II (siehe Kapitel 3) wurden fünf Sonden mit Winkeln von 45° (US-1, US-2, US-4, US-5) bzw. 90° (US-3) von unten in das Primär-U-Rohr eingebaut.

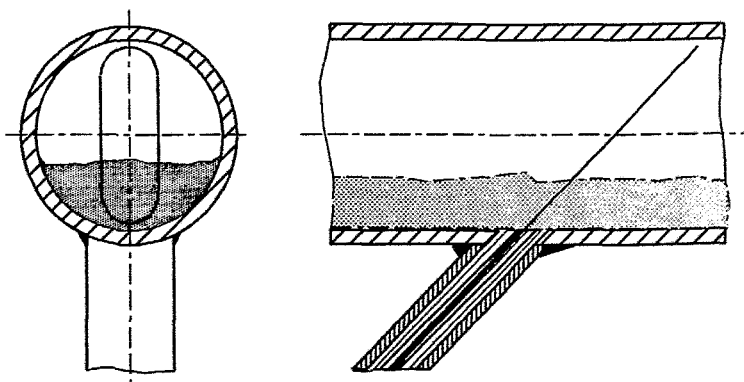


Bild 2 Schematische Darstellung der Lage der Sonde im Heizrohr (Einbauwinkel 45°)

Das Funktionsprinzip des Gebers kann wie folgt dargestellt werden. Elektrische Impulse erzeugen akustische Wellen im Piezoelement. Im Wellenleiter werden die

Longitudinalwellen bis zum Sensor geleitet, wo an der Übergangsstelle zum Sensor eine Wandlung in gekrümmte Wellen stattfindet, welche sich dann sowohl in Richtung als auch entgegen des Uhrzeigersinns ausbilden. Die gekrümmten Wellen bewegen sich gegenläufig mit gleicher Phase um den Ring. Erreichen die Impulse der gekrümmten Wellen wieder die Übergangsstelle vom Sensor zum Wellenleiter, werden diese in Longitudinalwellen rücktransformiert und erreichen über den Wellenleiter wieder das Piezoelement. In Abhängigkeit zum Füllstand im Rohr ändert sich die Eintauchtiefe des Sensorkopfes in die flüssige Phase, was zur Änderung der Geschwindigkeit der gekrümmten Wellen führt. Die Änderung der Eintauchtiefe führt damit zur Änderung der Ausbreitungszeit der Impulse. Die elektrischen Kennziffern des Gebers sind in Tabelle 1 enthalten. Im Bild 3 ist ein charakteristisches Oszillogramm der empfangenen Signale einer ausgewählten Sonde dargestellt.

Arbeitsfrequenz	250 kHz
Impulsfolgefrequenz	200 Hz
Verzögerung der Ausbreitung der gekrümmten Wellen	ca. 20 μ s
Änderung der Verzögerung bei Eintauchen des Sensors in die flüssige Phase	ca. 1 μ s
elektroakustische Verluste des Signals	ca. 50 dB

Tabelle 1 Kenngrößen der US-Geber

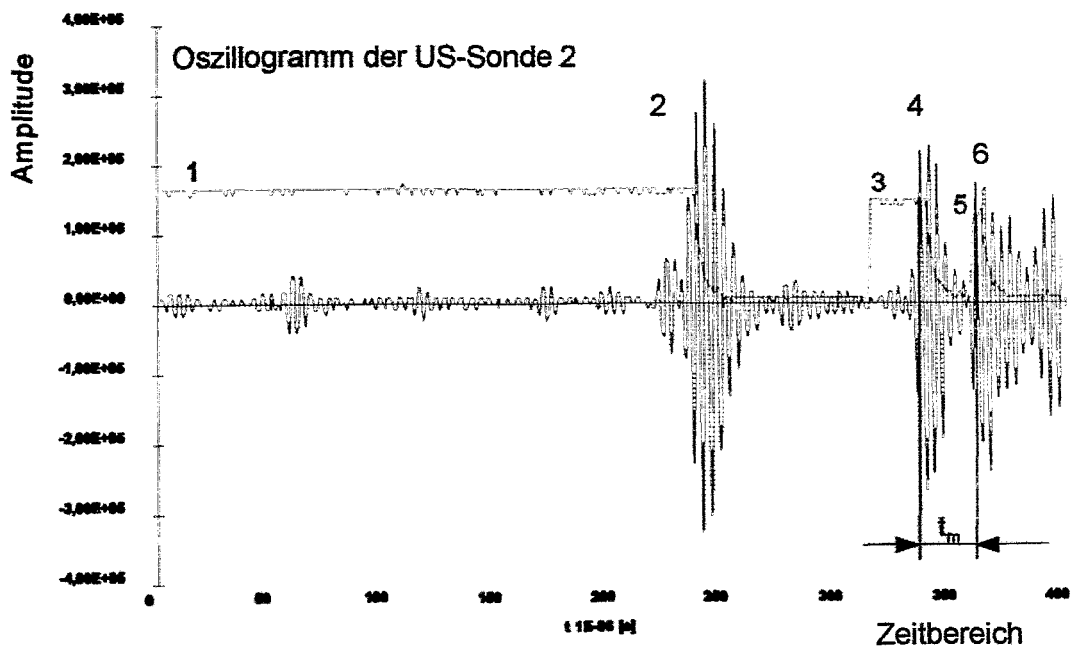


Bild 3 Typisches Oszillogramm einer US-Sonde bei reiner Dampfbeaufschlagung

Dabei sind:

- 1 - die Amplitude des ersten Eichimpulses (Strobimpuls),
 - 2 - das erste Echo bei der Dichtung des Wellenleiters am Konus,
 - 3 - die Amplitude des zweiten Eichimpulses,
 - 4 - das zweite Echo an der Schweißstelle zwischen Sensorkopf und Wellenleiter (identisch mit dem Startzeitpunkt des Meßimpulses),
 - 5 - die Amplitude des dritten Eichimpulses,
 - 6 - das dritte Echo nach einem Schleifenumlauf der gekrümmten Wellen um den Sondenkopf an der Schweißstelle zwischen Sensorkopf und Wellenleiter (identisch mit dem Ende des Meßimpulses),
- t_m - Zeitbereich für einen Schleifenumlauf zwischen Start und Ende des Meßimpulses.

Der Zeitbereich t_m ist proportional der an der Sonde anliegenden Fluidichte und damit ergibt sich eine Proportionalität zwischen einer Veränderung der Laufzeit und einer Veränderung des Kondensathöhenstand bei geschichteter Strömung. Eine Auswertelektronik wandelt die Laufzeit zwischen zweitem und drittem Echo in ein übliches Standardsignal (0...10V oder 4...20 mA) um, welches mittels PC-Meßtechnik erfaßt wurde.

4 Die Anwendung der US-Meßtechnik an der Versuchsanlage HORUS-II

Die Versuchsanlage HORUS-II (test facility of **HOR**izontal **U**-tube **S**treamgenerators) stellt ein Modell eines liegenden Dampferzeugers für Kernreaktoren des Typs WWER-440 bzw. WWER-1000 dar und ist ein Einzeleffektversuchsstand mit einem einzelnen U-Rohr als Versuchsrohr der Primärseite und einem Druckbehälter mit originalen Auslegungsparametern als Sekundärseite. Der Versuchsstand HORUS-II ist an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Sozialwesen Zittau/Görlitz (FH) errichtet worden und dient insbesondere zu thermohydraulischen Untersuchungen des primärseitigen Dampferzeugerverhaltens von WWER-Kernkraftwerken bei kleinen Leckstörfällen (SBLOCA). Das U-förmige Versuchsheizrohr besteht aus dem Material DIN 1.4541 (X 10 CrNiTi 18.10). Damit entspricht es in seinen Materialeigenschaften nahezu dem Original (X 8 CrNiTi 18.10). Mit einem Durchmesser von 16x1,5 (WWER-440: 16x1,4; WWER-1000: 16x1,5) und einer Länge von 9183 mm, welche die durchschnittliche Länge eines mittleren Heizrohres in der Originalanlage darstellt, wird der Einhaltung des geometrischen Ähnlichkeitskriteriums $l_{Orig}/d_{Orig} = l_{Exp}/d_{Exp}$ entsprochen. Die primärseitigen Auslegungsgrenzen liegen bei 80 bar und 300 °C. Die Sekundärseite kann mit maximal 64 bar und 300 °C betrieben werden. Eine Übersicht über die Komponenten der Anlage und Gesamtanlagenkonfiguration von HORUS-II ist im Bild 4 dargestellt.

Das Simulationsheizrohr ist mit verschiedenen Meßwertgebern bestückt. Nickel-Chrom/Nickel-Thermoelemente sind für die Temperaturmessung im Rohr, in der Rohrwand und auf der Heizrohräußenoberfläche installiert. Elektrische Druck- und Differenzdrucktransmitter werden für die Messung von Drücken, Druckverlusten, Geschwindigkeiten und Füllständen eingesetzt.

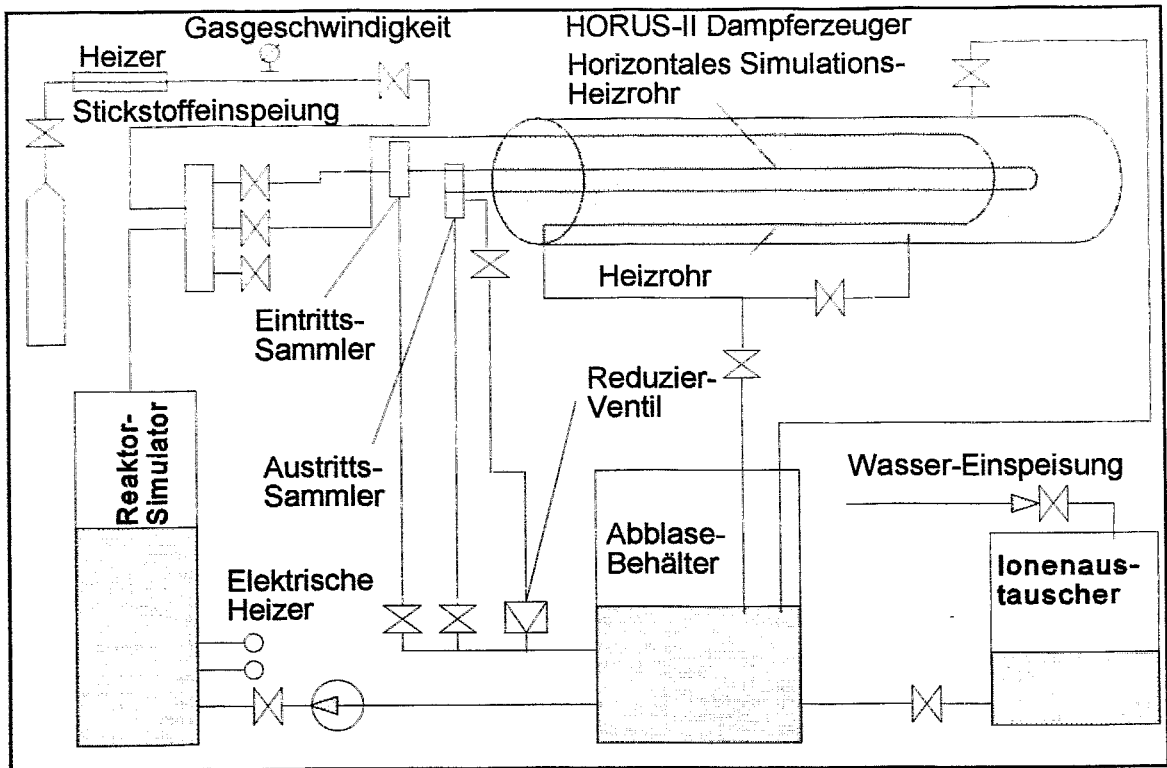


Bild 4 Gesamtanlagenkonfiguration der Versuchsanlage HORUS-II

Das US-Meßsystem besteht aus fünf Sonden. Die fünf US-SE-Köpfe sind außerhalb der Sekundärseite am Instrumentierungsring angebracht. Die Positionen der Sondenköpfe im primären U-Rohr zeigt Bild 5.

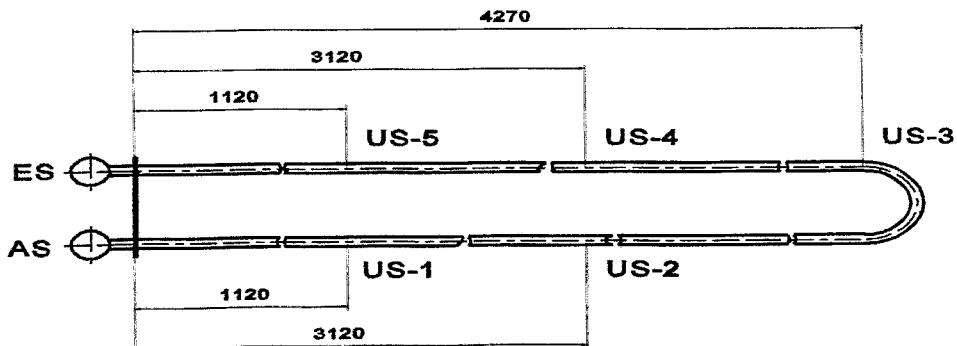


Bild 5 Längspositionen der US-Sonden am primären Heizrohr der Anlage HORUS-II

Bei der Auswertung der in eine Standardspannung (0...10V) umgewandelten Laufzeitmessung zwischen zweitem und drittem Echoimpuls der US-Sonden mußte die Temperatur- und Füllstandsabhängigkeit der Laufzeit berücksichtigt werden.

Die ausgegebene Spannung U_{out} kann deshalb in der Form:

$$U_{out} = U_{T = const.} (I) + \Delta U_{l = const.} (\Delta T) \quad (4)$$

mit U - Spannung,
 T - Temperatur,
 l - benetzte Sondenlänge,

geschrieben werden, wobei gilt:

$$\Delta U_{l = 0} = U_{l = 0} (T=variabel) - U_{l = 0} (T=Referenz) \quad (5)$$

und für den linear verlaufenden Meßbereich zwischen oberer und unterer Umlenkung am Sondenkopf kann

$$U_{T = const.} (I) = U_{l = 0} + c_l * I \quad (6)$$

angesetzt werden. Ebenfalls gilt:

$$U_{l = 0} (T=variabel) = U_{l = 0} (T=Referenz) + c_T * T \quad (7)$$

Damit ergibt sich für die benetzte Länge l:

$$l = \frac{U_{out} (I, T) - U_{l = 0} (T=Referenz) - c_T * T}{c_l} \quad (8)$$

und für den Füllstand im Rohr h:

$$h = l * \sin \alpha \quad (9)$$

mit α - Einbauwinkel des Sensors im horizontalen Rohr.

Die Konstanten $U_{l=0}(T=Referenz)$, c_T und c_l wurden über Kalibrierexperimente bei vollständig freigelegter und vollständig benetzter Sonde an zwei Temperaturpunkten für jede Sonde bestimmt.

5 Experimentelle Ergebnisse

Mit der Versuchsanlage HORUS-II wurde der Einzeleffekt der Kondensation von Dampf und Gemischen von Dampf und nichtkondensierenden Gasen in engquerschnittigen horizontalen Rohrleitungen untersucht. Untersuchungsschwerpunkte waren die Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten bei Kondensation und die Parameterverteilung im U-Rohr. Die gewonnenen Daten dienen der Validierung von

Einzelmodellen des Thermohydraulikcodes ATHLET [5] für die Bedingungen von WWER-Anlagen. Eine detaillierte Beschreibung der Versuchsanlage, der eingesetzten Meßtechnik, der Art und Anzahl der Experimente sowie der Versuchsdurchführung ist in [6] enthalten. Am Beispiel des ausgewählten Experimentes PCHS.25 der Versuchsserie PCHS (Kondensationsexperimente mit reinem Dampf, geschlossenem Reduzierventil und horizontaler Rohrlage) sollen hier Ergebnisse der US-Messungen kurz vorgestellt werden. Auf das allgemeine Anlagenverhalten für das Experiment PCHS.25 kann aus den im Bild 6 dargestellten Meßergebnissen geschlossen werden.

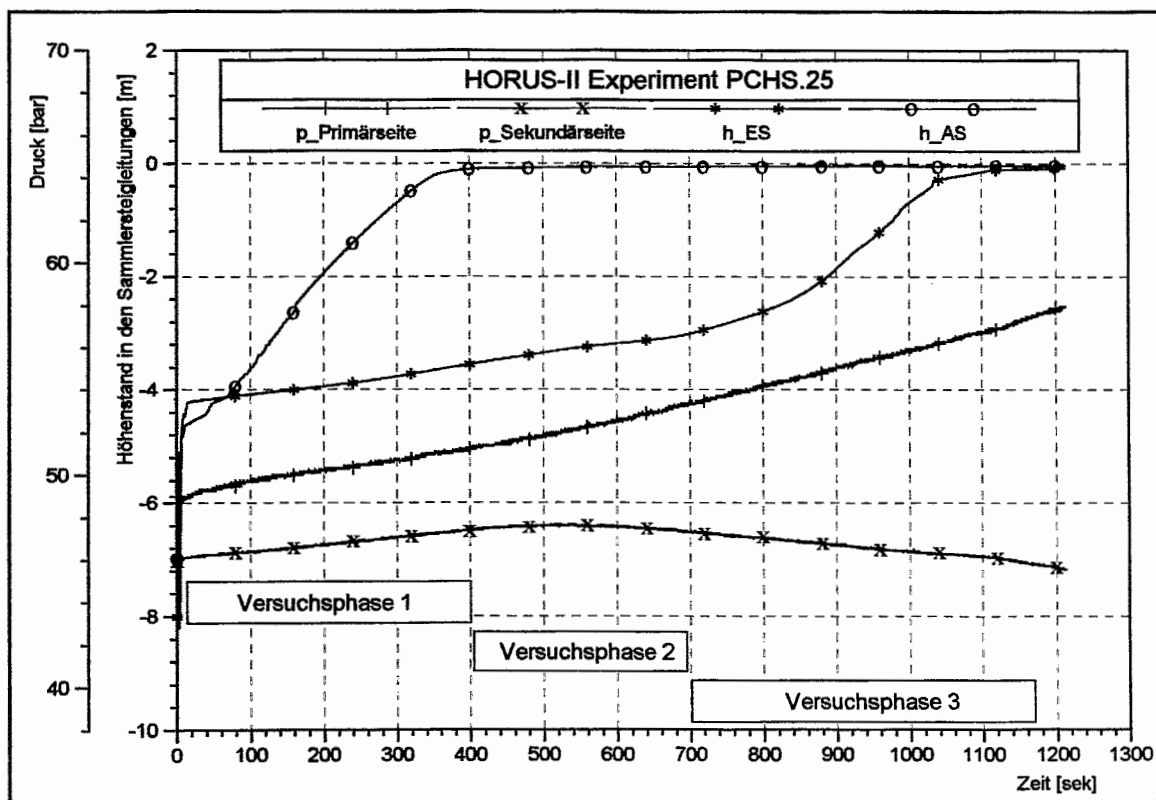


Bild 6 Verläufe des Primär- und Sekundärdruckes sowie der Füllstände in den Ein- und Austrittssammlern während des Experimentes PCHS.25

Man erkennt drei charakteristische Versuchsphasen.

- Phase1: Quasistationäres Anlagenverhalten mit Auffüllen des Austrittssammlers,
- Phase2: Rückstau des Kondensats vom Austrittssammler beginnend im U-Rohr, verbunden mit der Abnahme der wärmeübertragenden Fläche,
- Phase3: Weiterer Kondensataufstau im U-Rohr und Gegenströmung von eintretendem Dampf und rückströmendem Kondensat in den Eintrittssammler.

Während des Versuches PCHS.25 traten damit verschiedene Strömungszustände sowohl in den einzelnen Phasen (zeitabhängig) als auch während einer Versuchsphase entlang des Rohres (ortsabhängig) auf. Bild 7 zeigt die Ergebnisse der Höhenstandsmessungen im U-Rohr mit den US-Sonden.

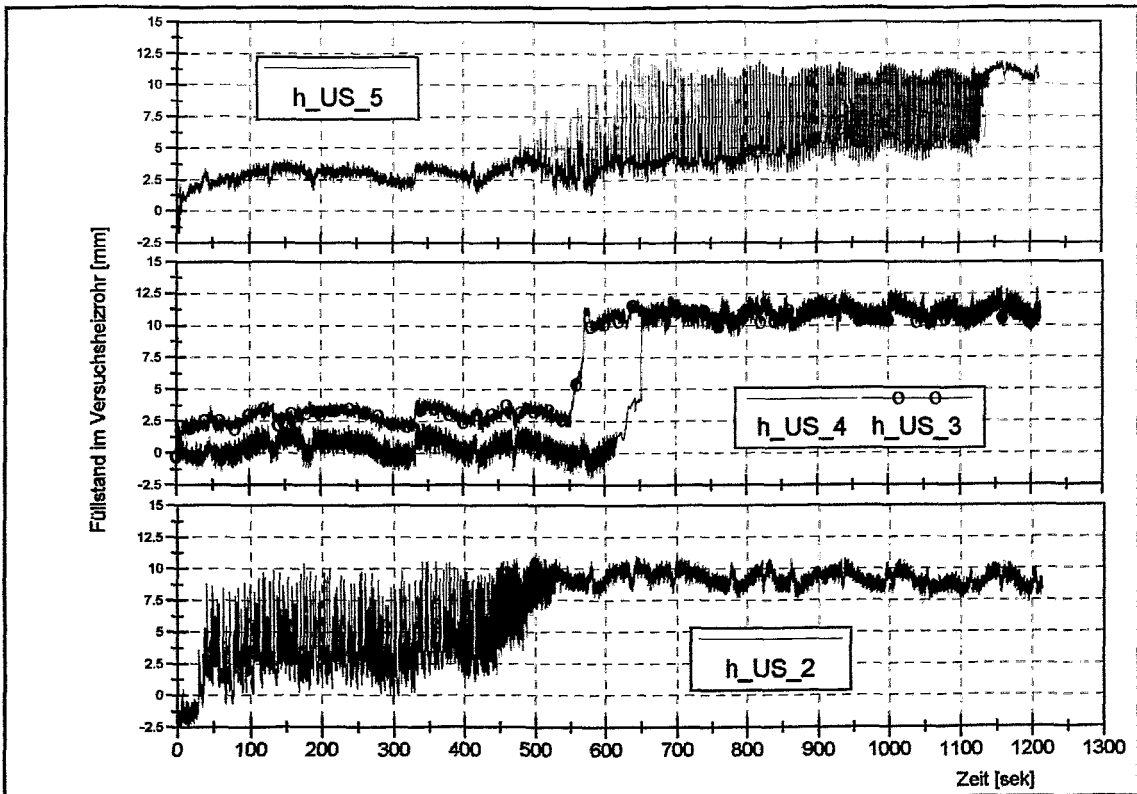


Bild 7 Verläufe der Füllstandsmessungen mit den US-Sonden für das Experiment PCHS.25

Die Sonden US_3 ... US_5, die auf der Eintrittsseite des U-Rohres lagen, zeigten in der ersten Versuchsphase gleichmäßige Höhenstände an, was auf eine Ringströmung mit stratifiziertem Sumpffüllstand in diesem Bereich schließen läßt. Bei der Sonde US_2, die sich auf der Austrittsseite des U-Rohres befand, war der Kondensatanteil schon so angewachsen, daß eine Wellenströmung in dieser Phase beobachtet werden konnte. Die Ausschnittsvergrößerung des Füllstandsverlaufes im Bereich von 158 bis 178 Sekunden Versuchszeit, im Bild 8 unten, zeigt, daß US_2 eine stratifizierte Grundströmung im Sumpf des Rohres von ca. 2,5 mm anzeigte, die von langphasigen aber kurzen Wellen bis zu einer Höhe von ca. 10 mm überlagert wurde. Als diversitäre Signale wurden im Bild 8 oben in der Nähe von US_2 gelegene primärseitige Thermo-elemente (TE) aufgetragen, die sich in unterschiedlichen Höhen an einer Längenposition des Rohres befanden. Man erkennt, daß das 2,5mm von unten eintauchende TE bereits vollständig mit Kondensat bedeckt war und nur unmittelbar nach einer Welle mit der entsprechenden Wellenfrequenz leicht aufgeheizt wurde. Das läßt auf ein Absinken des Füllstandes nach jeder Welle schließen, wie es auch von US_2 angezeigt wurde. Demgegenüber zeigte das in 7 mm Höhe gelegene TE Sättigungstemperatur und damit Dampf an, was durch ein periodisches Eintauchen in Kondensat mit einer Frequenz von ca. 0,2 Hz unterbrochen wurde. Mit der Phasenverschiebung zwischen den TE und US_2 läßt sich unter Berücksichtigung der Einbaupositionen entlang des Rohres auch auf die Strömungsgeschwindigkeit der Wellen schließen.

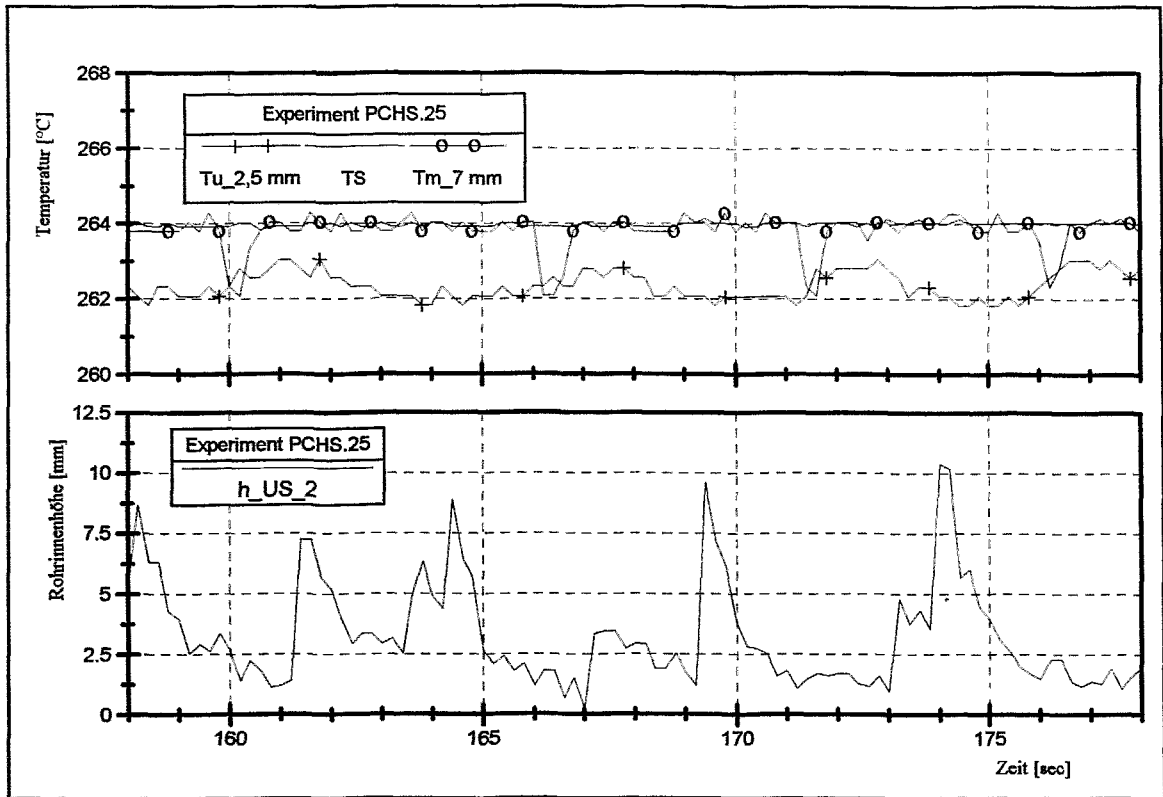


Bild 8 Vergleich von Temperatur- und Ultraschallmeßdaten im Austrittsbereich des U-Rohres für die Versuchsphase 1 des Experimentes PCHS.25

Nach dem Füllen des Austrittssammler staute sich das Kondensat vom Austrittssammler beginnend im Rohr auf. Nacheinander wurden die in der entsprechenden Reihenfolge liegenden Sonden rasch vollständig benetzt (Bild 7). Nur US_5, die im unmittelbarem Eintrittsbereich lag, zeigte in Phase 2 beginnend bis Ende der Phase 3 starke Füllstandsschwankungen an.

Im Bild 9 werden die Meßdaten von US_5 für die Versuchsphase 3 als Ausschnittsvergrößerung im Bereich von 925 ... 950 Sekunden Versuchszeit dargestellt. Die Phase 3 ist durch eine Gegenströmung von eintretendem Dampf und rücklaufendem Kondensat gekennzeichnet. Die Sonde US_5 zeigte in dieser Phase Schwall- oder Pfropfenströmung an. Das zyklische Auftreten von Dampfpfropfen und Kondensatschwällen kann auch hier anhand diversitärer Meßverfahren nachgewiesen werden. Die Differenzdruckmessung dp_1 , welche den Heizrohrabschnitt zwischen dem Eintrittssammler und einer Rohrlänge von 2943 mm ausmißt, kann bei geringer Strömungsgeschwindigkeit auch als Füllstandsmessung an der Meßposition interpretiert werden, da die Ausgleichsleitung von unten an das Heizrohr angebracht wurde. Wie im Bild 9 ersichtlich, bestätigte diese Differenzdruckmessung die durch US_5 gewonnenen Erkenntnisse. Die in der oberen Höhenlinie des Heizrohres installierte Wandtemperaturmessung T_{wi_ES1} zeigte mit den Aufheizungs- und Abkühlphasen, daß die Schwallbildung des Kondensats den gesamten Strömungsquerschnitt bis zur oberen Höhenlinie ausfüllt.

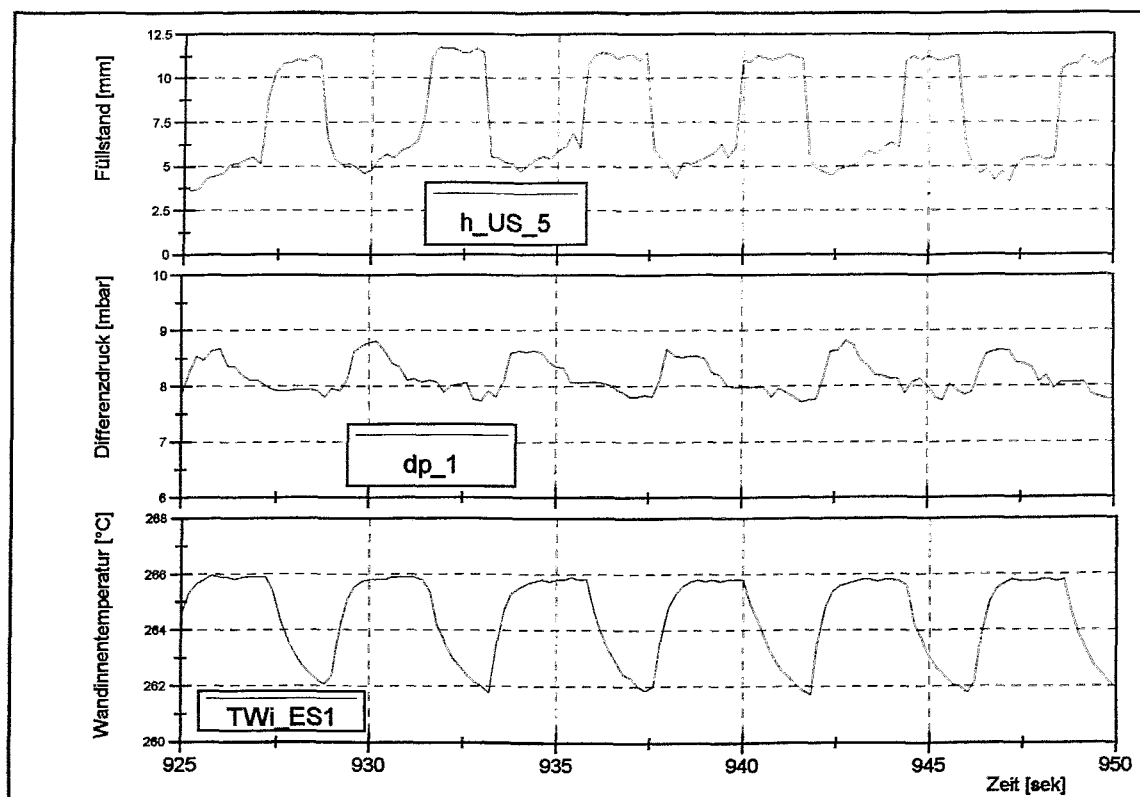


Bild 9 Vergleich von Temperatur-, Differenzdruck- und Ultraschallmeßdaten im Eintrittsbereich des U-Rohres für die Versuchsphase 3 des Experimentes PCHS.25

6 Zusammenfassung

Das neuartige US-Meßverfahren war in der Lage, die bei den Bedingungen der Kondensationsexperimente an HORUS-II auftretenden Strömungsformen wie stratifizierte Strömung, Wellenbildung auf der Schichtenströmung, Schwall- bzw. Pfropfenströmung in einem engquerschnittigen, horizontalen Rohr zu identifizieren und charakteristische Parameter zu quantifizieren. Die Ergebnisse der US-Messungen wurden auch mit punktuellen diversitären Meßverfahren bestätigt. Hinsichtlich der Standfestigkeit der Sonden wurden keinerlei Probleme über einen Zeitraum von mehreren Monaten festgestellt. Ob sich die sensiblen Edelstahlsondenschleifen auch in hochdynamischen Systemen standfest verhalten, war nicht Gegenstand der Experimente und muß somit für den jeweiligen Einsatzzweck separat untersucht werden. Die vom Hersteller bereitgestellte Auswerteelektronik ist für professionelle Einsatzzwecke noch zu verbessern. Augenmerk sollte dabei auf die Verringerung der Schwankungs- und damit Fehlerbreite des Ausgangssignals sowie der Betriebssicherheit und Standfestigkeit der Auswerteeinheit gelegt werden. Zusammenfassend konnte mit den HORUS-II Experimenten die Eignung des neuartigen US-Verfahrens für die Bestimmung von Flächenvolumendampfgehalten über einen Strömungsquerschnitt nachgewiesen werden.

Literatur

- [1] F. Mayinger
"Strömung und Wärmeübergang in Gas-Flüssigkeits-Gemischen"
Springer Verlag, Wien New York, 1982
- [2] T.N. Tandon, H.K. Varma und C.P. Gupta
"A new flow regimes map for condensation inside horizontal tubes"
Journal of Heat Transfer 104, S. 763-768 (1982)
- [3] F. Schäfer
"Entwicklung eines Verfahrens zur Höhenstandsmessung mittels Ultraschallsensoren"
Bericht THZ-61202-04, Zittau, März 1994
- [4] W.I. Melnikov und G.B. Usinin
"Akustitscheskije Metodi Diagnostiki dwuchphasnich Teplonositeljei JAEU"
Energoatomisdat, 1987
- [5] G. Lerchl und H. Austregesilo
"ATHLET Mod 1.1 - CYCLE C, User's Manual"
GRS mbH, Oktober 1995.
- [6] S. Alt
"Experimente mit der Einzeleffektversuchsanlage HORUS-II Versuchsphase B"
Bericht THZ-601202-04, Zittau, April 1997

Zur Kenntnisnahme

Die in diesem Artikel vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des BMBF-Projektes Nr. 150 0984/8 " Experimentelle Untersuchungen zum thermohydraulischen Verhalten der Heizrohre liegender Dampferzeuger von Kernkraftwerken mit WWER unter Störfallbedingungen" vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie gefördert.

MESSUNG DER FÜLLHÖHE VON TRANSIENTEN ZWEIPHASEN-SCHWALLSTRÖMUNGEN IN ROHRLEITUNGEN MITTELS ULTRASCHALL

B. Hofmann und M. Rockstroh

*Technische Universität Dresden, Institut für Energiemaschinen und Maschinenlabor, Lehrstuhl für Meß- und Automatisierungstechnik,
Leiter: Prof. Dr.-Ing. habil. E. Kaiser, D-01062 Dresden*

1. Einleitung

Zur experimentellen Bestimmung charakteristischer Parameter von Zweiphasenströmungen werden häufig Sondenverfahren und laser-optische Verfahren eingesetzt. *Sondenverfahren* gestatten lokale Messungen, wobei jedoch einerseits die Sonden (Leitfähigkeits-, faseroptische Sonden) die Strömung beeinflussen können und andererseits das strömende Fluid die Meßeigenschaften der Sonden verändern kann. *Laser-optische Verfahren* ermöglichen lokale und integrale Messungen von Strömungszuständen in optisch hinreichend durchlässigen Fluiden. Sie erfordern aber auch optisch durchlässige Behälterwandungsbereiche und die Versetzung der Strömung mit Partikeln, sogenannten Tracern. Diese müssen definierte Eigenschaften bezüglich Dichte, Größe, Lebensdauer und Reflexionsgrad aufweisen. Für integrale Strömungsmessungen sind auch *radioaktive Meßverfahren* geeignet.

Ultraschall-Meßverfahren sind seit mehreren Jahren bei der Messung von Füllständen in Behältern sowie bei der Durchflußmessung in Gasen und Flüssigkeiten im Einsatz. Seit einiger Zeit wird das auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Materialprüfung bewährte *Ultraschall-Impulsecho-Verfahren* auch zur Bestimmung von Strömungsprofilen sowie in der Zweiphasenmeßtechnik verwendet. Da beim Einsatz von Ultraschallwellen für Meßzwecke sehr geringe Schalleistungen benötigt werden, sind Rückwirkungen der Schallwellen auf das Strömungsfeld bisher nicht festgestellt worden und deshalb vernachlässigbar. Seine Anwendung ist aus diesem Grunde auch für den Betreiber gefahrlos. Ultraschall-Meßverfahren gestatten lokale und integrale Messungen von außen ohne Eingriff in die Prozeßapparatur (clamp-on-Technik) und ermöglichen einen einfachen, robusten Aufbau der Meßeinrichtung vor Ort. Die räumliche Auflösung des Verfahrens ist vielfach ausreichend. Wie hier gezeigt wird, ist es insbesondere geeignet zur Detektion von Phasengrenzen auch in strömenden Flüssigkeiten in voll- oder teilgefüllten Behältern und Rohrleitungen [1,3-13].

2. Meßprinzip des Ultraschall-Impulsechoverfahrens

Das Prinzip des Ultraschall-Impulsecho-Meßverfahrens zeigt **Bild 1** [9,10]. Von einem sog. Ultraschall-Prüfkopf, der von einem elektronischen Ultraschall-Prüfgerät (nicht gezeichnet) angesteuert wird, werden mittels piezoelektrischer Dickenschwinger Ultraschall-Impulse (Bursts) erzeugt und durch eine Koppelschicht und durch die Rohr- bzw. Behälterwandung hindurch von außen in die Strömung hinein gesendet. Die Ultraschallgeräte kommen nicht mit der Strömung in Berührung und sind

nicht unmittelbar den Prozeßbedingungen ausgesetzt. Die Ultraschallfrequenz liegt in der Regel zwischen 1 MHz und 15 MHz.

Die Sendepulse durchdringen das strömende Medium und werden ggf. an Phasengrenzen oder auch an Blasen bzw. Partikeln reflektiert, die sich in der Ausbreitungsrichtung des Schallfeldes befinden. Außerdem erreicht ein Teil der Schallwellen die gegenüberliegende Wand der Rohrleitung oder des Behälters und wird dort reflektiert. Die reflektierten Schallwellen werden vom gleichen Ultraschallsender, der auch als Schallempfänger arbeitet, als Echos empfangen und vom Ultraschall-Prüfgerät mit dem Sendeburst synchronisiert dargestellt. Das Prüfgerät ist aus der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung bekannt. In der Regel können kommerziell verfügbare Geräte verwendet werden.

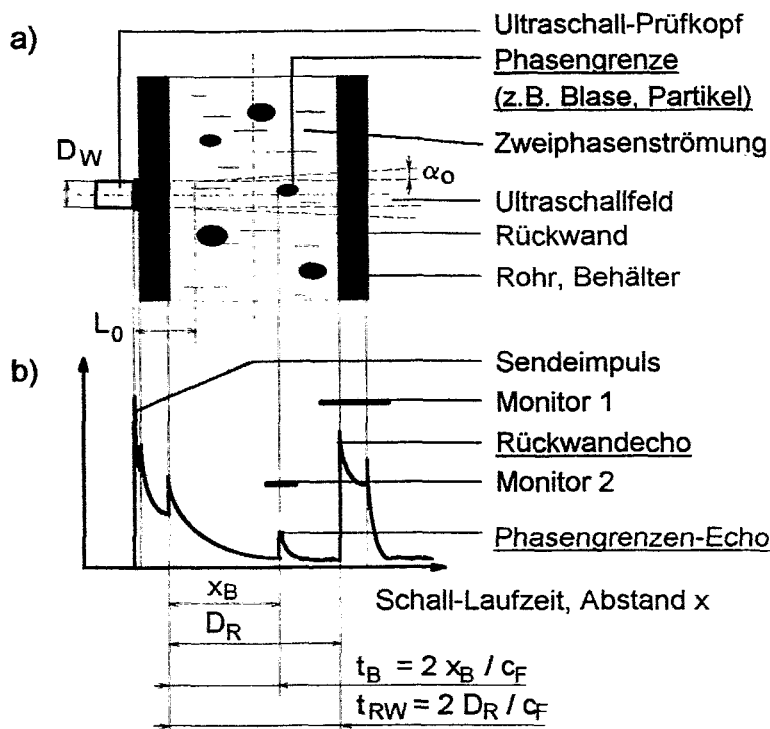


Bild 1: Prinzip des Ultraschall-Impulsecho-Verfahrens für Strömungsmessungen in Rohren oder Behältern (a - Versuchsaufbau, b - Echogramm)

Auf Grund der unterschiedlichen Schalllaufzeiten für das Phasengrenzen-Echo und das Rückwand-Echo können diese im Echogramm (A-Bild) mittels sog. Monitore getrennt ausgewertet werden. Die Monitore sind nach Position, Breite und Ansprechschwelle elektronisch auf einfache Weise variierbar. Jeder Monitor entspricht somit einer Sonde, die je nach Einstellung die Strömung mehr oder weniger punktförmig oder über nahezu den gesamten Echobereich des Ultraschallstrahles (z.B. Rohr-Durchmesser) abtastet.

Über die gemessene Laufzeit t_B der Ultraschallwellen ist die Position x_B der Phasengrenze (auch einer Blase oder eines Partikels) in bekannter Weise bestimmbar [8,9]:

$$x_B = t_B \cdot c_F / 2 \quad (1)$$

wobei c_F die Schallgeschwindigkeit im Fluid bedeutet. Infolge der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit c_F muß stets die Temperatur des Fluids berücksichtigt werden.

Kann die Schallgeschwindigkeit c_F als konstant betrachtet werden, so ist die Position x_B der Phasengrenze der Schalllaufzeit t_B direkt proportional:

$$x_B = k_1 \cdot t_B \quad \text{mit} \quad k_1 = c_F / 2 \quad (2)$$

Über die Monitore des Ultraschall-Prüfgerätes können entweder die Laufzeit t_B oder die Position x_B der Phasengrenze als elektrisches Spannungssignal dargestellt werden. Dieses Signal kann nach Bedarf weiterverarbeitet werden.

3. Meßaufbau

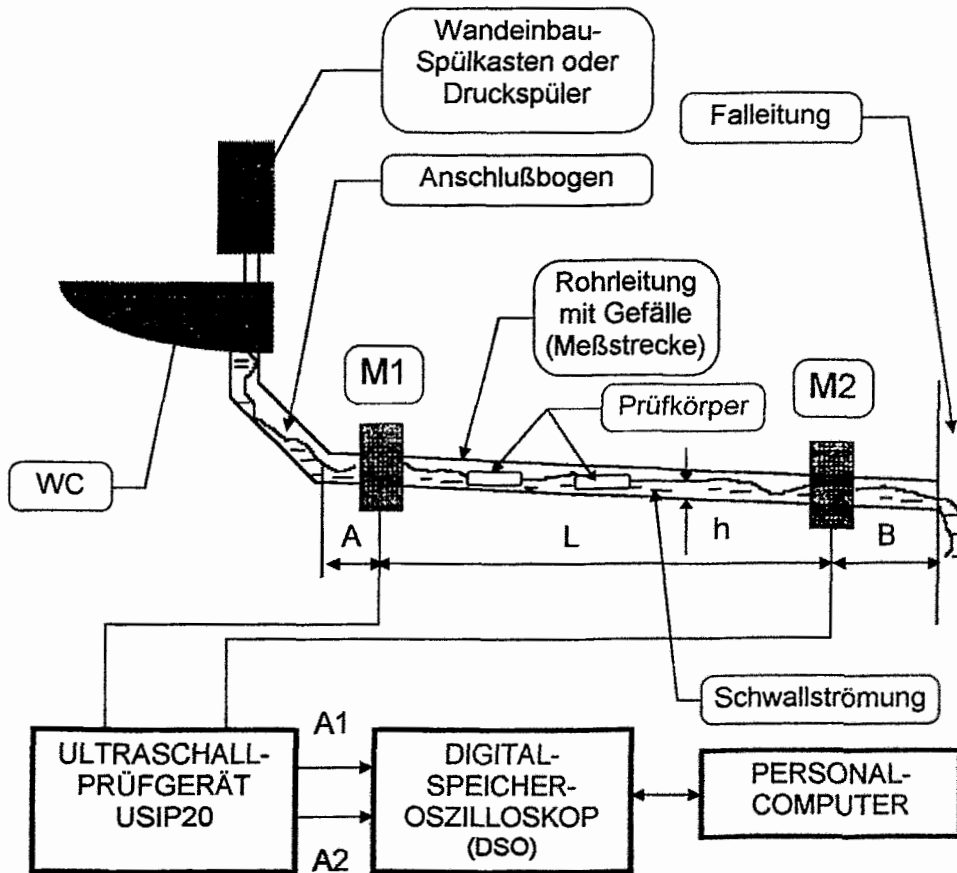


Bild 2: Aufbau des Prüfstandes sowie der Meß- und Auswerteinrichtung für die Füllhöhe h in der „Rohrleitung“ (M1, M2: Ultraschallmeßstellen)

Ziel der Ultraschallmessungen war die Bestimmung des zeitlichen Verlaufes der Füllhöhe h einer transienten, drall- und wellenbehafteten Schwallströmung in teilgefüllten, etwa horizontal verlegten Rohrleitungen vom Durchmesser d , siehe **Bild 2**. Der Füllungsgrad h/d war dabei im Bereich $0,1 \leq h/d \leq 0,6$ zu erwarten. Als Meßstrecke wurden auswechselbare Rohrleitungen aus Glas bzw. Kunststoff der Nennweiten $d = DN = 60, 70, 80$ und 100 mm bei Wandstärken s_{MAT} von etwa $(2 \dots 5)$ mm

eingesetzt. Die Schwallversuche wurden in der Regel jeweils für 4 Werte des Rohrleitungs-Gefälles, und zwar 5, 10, 15 und 20mm/m durchgeführt [2].

Die Meßeinrichtung bestand aus den beiden Ultraschall-Meßstellen M1 und M2 sowie dem Ultraschall-Prüfgerät USIP 20. Die Meßstellen M1 und M2 enthielten sog. Ultraschall-Senkrecht-Prüfköpfe, die als Sender und Empfänger für die Ultraschallwellen arbeiteten. Sie enthielten jeweils einen piezoelektrischen Ultraschall-Sende-Empfangswandler als aktives Element und wurden von außen und unten an der Rohrleitung angeklemt. Der Meßort konnte in Rohr-Längsrichtung sowie am Rohrumfang in einfacher Weise verschoben werden. Für die Versuche jedoch waren die Meßstellen M1 und M2 in der Regel in einem Abstand von etwa $L=4\text{m}$ voneinander angebracht. Die Abstände der Meßstellen von der Einspeisungsstelle bzw. von der Mitte der Falleitung betragen etwa $A=B=0,5\text{m}$.

Infolge des sehr niedrigen Leistungsniveaus der hier angewendeten Ultraschallwellen (im μW -Bereich) und der Clamp-on-Technik ist jede störende oder schädigende Beeinflussung der Wasserströmung, des Prüfstandes und des Bedienungspersonals durch die Meßeinrichtung ausgeschlossen.

4. Messung und Registrierung der Füllhöhe

Zur Bestimmung der Füllhöhe h wurde die Laufzeit t_B der Ultraschallwellen vom Prüfkopf zur Flüssigkeitsoberfläche im Rohr und zurück mittels der Monitore des Ultraschall-Prüfgerätes ausgewertet (sog. Primär-Echo). Da der Prüfkopf außen am Rohr angebracht war, mußte die Rohrwandstärke und die Schallgeschwindigkeit in der Rohrwandung bei der Auswertung berücksichtigt werden. Die Laufzeitmessung erfolgte in Abständen von etwa 1ms. Dadurch wurde eine gute Auflösung des zeitlichen Verlaufs der Füllhöhe erreicht.

Die Laufzeit der Ultraschallwellen wurde auf eine quasi-analoge elektrische Meßspannung U_{DSO} im Bereich (0...5)V abgebildet. Die Meßspannung U_{DSO} ist somit der Füllhöhe h proportional. Dieser Spannungsverlauf wurde mittels eines digitalen Speicher-Oszilloskopes (DSO) aufgezeichnet, in einem PC digital abgespeichert und softwaregestützt ausgewertet.

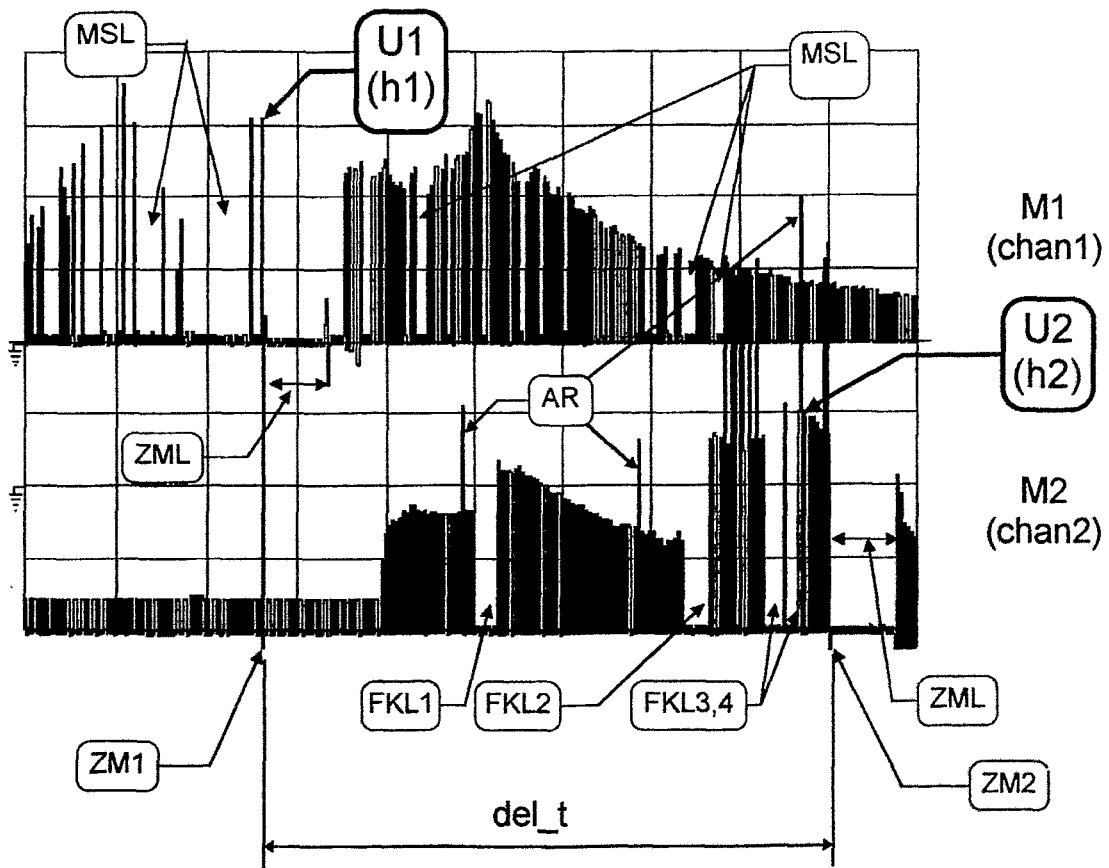
5. Auswertung der Füllhöhenmessungen

Bild 3 zeigt den Verlauf der Meßspannung U_{DSO} als Funktion der Zeit t für die Meßstellen M1 und M2. Wellen, Drill, Strömungs-Turbulenzen sowie in die Strömung eingebrachte Testkörper haben typische Echoerscheinungen zur Folge, die bei der Auswertung zu berücksichtigen waren.

Die Aufzeichnung der Füllhöhen beginnt am linken Rand des Diagramms in **Bild 3**. Dieser Start der Registrierung (sog. Triggerzeitpunkt) erfolgt automatisch, sobald nach Auslösung des Schwallströmungsvorganges die Spülwasserhöhe in der Rohrleitung an der Ultraschall-Meßstelle M1 die sog. Triggerschwelle erreicht hat. Diese entspricht einer Flüssigkeitshöhe von etwa 8-10 mm. Die Dauer des transienten Strömungsvorganges von diesem Triggerzeitpunkt bis zum Durchtritt des letzten der vier eingesetzten Prüfkörper nach DIN 1385 (S. 12 ff.) oder der 50 Prüfkugeln nach

E DIN EN 997 durch die Ultraschall-Meßstelle M2 beträgt weniger als 15 s, in der Regel sogar weniger als 10 s.

Die Füllhöhen-Aufzeichnungen in den Schrieben von **Bild 3** weisen eine Reihe typischer Merkmale auf, die für die Auswertung von Bedeutung sind:



Abbildungsmaßstäbe: Vertikal: 500mV/div, Horizontal: 1s/div

Bild 3: Verlauf der Füllhöhen-Meßspannung U_{DSO} über der Zeit t

Oberer Schrieb: Füllhöhenverlauf an Ultraschall-Meßstelle M1

Unterer Schrieb: Füllhöhenverlauf an Ultraschall-Meßstelle M2

del_t : Zeitlicher Abstand der Zeitmarken ZM1 und ZM2

a) Zeitmarken-"Lücke" ZML:

Die Zeitmarken ZM1 und ZM2 werden derzeit subjektiv durch Tastenbetätigung am DSO gesetzt. Dadurch wird das Meßsignal für kurze Zeit ($<1s$) kurzgeschlossen, wodurch die Zeitmarken-"Lücken" ZML entstehen. Sie stören die Auswertung (Bestimmung der Füllhöhen h_1 und h_2) jedoch nicht, da sie zeitlich nach, d.h. rechts von den Zeitmarken liegen.

b) Prüfkörper- "Lücke" FKL:

Bei turbulenz- und wellenarmer Strömung, günstiger Längslage und deutlich getrenntem Abschwimmen der Prüfkörper sind diese in den Ultraschall-Füllhöhen-

Aufzeichnungen gut zu erkennen, da sie dann typische "Lücken" in der Aufzeichnung hervorrufen, die in **Bild 3** mit FKL bezeichnet sind. Ein deutlicher Hinweis auf eine Prüfkörperlücke ist ein mehr oder weniger starker Anstieg der Füllhöhe h nach, d.h. rechts von einer solchen Lücke, siehe FKL1 und FKL2 in **Bild 3**. Dieser Anstieg wird durch den Wasserstau hinter dem Prüfkörper hervorgerufen.

c) Ausreißer AR

Bei Drallerscheinungen nach schrägem Wasserzulauf oder durch Turbulenzen infolge zu hoher Strömungsgeschwindigkeiten können sog. Sekundärechos anstelle der normalerweise zur Auswertung kommenden Primärechos vom Sensor erfaßt werden. Diese Sekundärechos haben häufig etwa die doppelte Laufzeit der Primärechos und täuschen folglich meist einen viel zu hohen Füllstand vor. Sie können meist gut von den regulären Meßwerten (Primär-Echos) unterschieden und als sog. Ausreißer von der Auswertung ausgeschlossen werden.

d) Meßsignal-"Lücke" MSL

Bei einer Neigung der Wasseroberfläche etwa in Richtung der Längsachse des Rohres, die z.B. durch Wellenbildung in Strömungsrichtung infolge von Strömungshindernissen wie Dichtwülsten oder Rohrstoßen sowie durch Turbulenzen infolge zu hoher Strömungsgeschwindigkeiten hervorgerufen werden kann, verschwinden meist nicht nur das Primär-Echo, sondern auch alle Sekundärechos. In diesem Falle wird kein Echo registriert. Der gemessene Füllstand ist dann scheinbar gleich Null oder überschreitet (bei größerem Rauschen) nicht einen unteren Schwellwert. Hält dieser Zustand eine merkliche Zeit an, entsteht eine Meßsignal-"Lücke" MSL im Meßsignal. Meßsignal-Lücken MSL lassen sich nur schwer von Prüfkörperlücken FKL unterscheiden.

6. Berechnung der Füllhöhe h

Aus **Bild 3** lassen sich die Füllhöhen h_1 und h_2 zu den gewünschten Zeitpunkten (Zeitmarken ZM1 und ZM2) bestimmen. Die Füllhöhen h in der Rohrleitung berechnen sich aus der gemessenen Echolaufzeit t_B , die auf die Spannung U_{DSO} abgebildet wird, nach folgender Gleichung:

$$\frac{h}{\text{mm}} \approx K_{DSO} \cdot \frac{U_{DSO}}{V} - \frac{h_{MAT}}{\text{mm}}, \quad (3)$$

wobei

- h - Füllhöhe des Rohres mit Wasser (in mm)
- h_{MAT} - korrigierte Rohrwandstärke (in mm)
- K_{DSO} - Proportionalitätsfaktor (in mm/V)
- U_{DSO} - Meßspannung (in V)

Der Proportionalitätsfaktor K_{DSO} hängt von Einstellungen des Ultraschall-Prüfgerätes USIP20 und der Wassertemperatur ϑ ab. Bei z.B. $\vartheta=16,5^\circ\text{C}$ hat K_{DSO} den Wert 20,26mm/V.

Die korrigierte Rohrwandstärke h_{MAT} läßt sich wie folgt berechnen:

$$h_{MAT} = s_{MAT} \frac{c_{H_2O}}{c_{MAT}}, \quad (4)$$

wobei

- c_{MAT} - Schallgeschwindigkeit im Rohrmaterial
- c_{H_2O} - Schallgeschwindigkeit in Wasser (1471,6 m/s bei $\vartheta=16,5^\circ\text{C}$)
- s_{MAT} - tatsächliche Rohrwandstärke

Da die Schallgeschwindigkeit in den zum Einsatz kommenden Rohr-Materialien höher ist als in Wasser, ist h_{MAT} kleiner als die jeweilige tatsächliche Rohrwandstärke:

Rohr-Material	s_{MAT} (mm)	c_{MAT} (ms^{-1})	h_{MAT} (mm)
PVC (transparent)	2,1	2200	1,4
Glas	3,6	5600	0,95
Glas	5,0	5600	1,3

7. Meßfehler

Die Meßergebnisse sind mit systematischen und zufälligen Fehlern behaftet. Hierzu wurden Fehlerrechnungen mit folgenden Ergebnissen durchgeführt:

Der systematische Fehler wird durch Unvollkommenheit der Meßgeräte, der Meßverfahren und des Versuchsstandes sowie von meßtechnisch erfaßbaren Umwelteinflüssen und persönlichen Einflüssen der Beobachter hervorgerufen. Der systematische Fehler der Füllhöhenmessung beträgt maximal $\pm 11,5\%$.

Der zufällige Fehler wird durch nicht erfaßbare und nicht beeinflussbare Änderungen der Meßgeräte, des Versuchsstandes, der Umwelt und der Beobachter hervorgerufen. Er läßt sich durch mehrmalige Messungen (Meßreihen) ausgleichen und durch die auf die arithmetischen Mittelwerte einer Meßreihe bezogenen Standardabweichungen charakterisieren. Diese betragen bei der Füllhöhenmessung in der Regel maximal $\pm 9\%$.

8. Zusammenfassung

Ziel der Ultraschallmessungen war die Bestimmung des zeitlichen Verlaufes der Füllhöhe einer transienten, drall- und wellenbehafteten Schwallströmung in teilgefüllten, etwa horizontal verlegten Rohrleitungen. Hierzu wurde die Laufzeit der Ultraschallwellen vom Prüfkopf zur Flüssigkeitsoberfläche und zurück gemessen. Die Laufzeit der Ultraschallwellen wurde auf eine quasi-analoge elektrische Spannung abgebildet. Der Spannungsverlauf wurde digital aufgezeichnet und softwaregestützt ausgewertet. Wellen, Drall, Strömungsturbulenzen sowie eingebrachte Prüfkörper in der Strömung hatten typische Echoerscheinungen zur Folge, die bei der Auswertung zu berücksichtigen waren. Da der Prüfkopf außen am Rohr angebracht war (clamp-on-Technik), mußte die Rohrwandstärke und die Schallgeschwindigkeit in der Rohrwandung mittels eines Korrekturgliedes in die Füllhöhenberechnung einbezogen werden.

9. Literatur

- [1] Braune, A.; Hofmann, B.; Rockstroh, M.; Will, G.: „Experimental Study on a Particles-Water Two-Phase Flow inside of a Centrifugal Pump by

- means of an Ultrasonic Pulse-Echo Method and Technique“
In: Abstracts of the XIXth International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 25.-31. August 1996, Kyoto, Japan, p. 234, paper ES3-04. Hrsg.: International Union of Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM).
- [2] Feurich, H.: „Sanitärtechnik“; Düsseldorf: Verlag Kramer, 1995, 7.Auflage
- [3] Hamann, D.; Lotzmann, R.; Uhlmann, G.:
„A Method for the Determination of the Bubble-Size Distribution in Liquid-Metal Two-Phase Flows“; In: Kernenergie 28 (1985)7, S.297-301
- [4] Hofmann, B.; Rockstroh, M.:
„Ultrasonic pulse-echo measurements of bubble and plug velocities in a gas-liquid two-phase flow“
In: Ultrasonics International '93, 6. - 8. Juli 1993, Wien (Oesterreich), Conference Proceedings, S. 343-346; Oxford etc.: ButterworthHeinemann Ltd., 1993; ISBN 0 750618 779
- [5] Hofmann, B.; Rockstroh, M.:
„Beitrag zur Bestimmung der Parameter und zur Detektion der Struktur von Zweiphasenströmungen mittels Ultraschall“
Egelsbach/Köln/NewYork: Verlag der Deutschen Hochschulschriften (DHS)/Hänsel-Hohenhausen, 1993; ISBN 3-89349-746-3
- [6] Hofmann, B.; Rockstroh, M.:
„Beitrag zur Bestimmung charakteristischer Parameter von Zweiphasenströmungen unter Verwendung des Ultraschall-Impulsecho-Verfahrens“
In: Fortschritte der Akustik, Plenarvorträge und Kurzreferate der 21. Deutschen Jahrestagung für Akustik, 13.-17. März 1995, Saarbrücken, Teil II, Seite 1083-1086. Hrsg.: Deutsche Ges. f. Akustik e.V. c/o C.v. Ossietzky Univ. Oldenburg; ISBN 3-9804568-0-3
- [7] Hofmann, B.; Rockstroh, M.:
„Two-phase flow measurements by means of the ultrasonic NDT instrumentation and technique“
In: Proceedings of the First Joint Belgian-Hellenic Conference on non-destructive Testing, 22.-23. Mai 1995, Patras, Greece, pp 207-212. Hrsg.: D.v. Hemelrijck and A. Anastassopoulos; Rotterdam/Brookfield: A.A. BALKEMA, 1996; ISBN 90 5410 595 X
- [8] Hofmann, B.; Rockstroh, M.:
„Study on acoustic waveguides and reflectors for use in ultrasonic two-phase flow measurement“; In: Ultrasonics 34 (1996), pp 431-434. Amsterdam etc.: Elsevier Science
- [9] Hofmann, B.; Rockstroh, M.:
„Messung fluiddynamischer Größen mittels Ultraschall“
In: Beitragsmanuskripte I des XXVIII. Kraftwerkstechnischen Kolloquiums / 6. Kolloquiums Meßtechnik für Energieanlagen, 29.-30.10.1996, Dresden, Seite 113-122, Beitrag V15, Hrsg.: E. Kaiser, K. Nöther.
- [10] Kuttruff H.: „Physik und Technik des Ultraschalls“; Verlag S. Hirzel, Stuttgart 1988
- [11] Prasser, H.-M.; Hensel, F.; Schütz, P.:
„Messung der Volumenströme von Gas und Flüssigkeit in einer Zweiphasenströmung mit Ultraschall und Mustererkennung“
Internat. Treffen für chemische Technik und BiotechnologieACHEMA, Frankfurt/M., 5.-11.6.94; Kurzfassungen der Vortragsgruppen Meß-, Analysen- und Prozeßleittechnik; Hrsg.: DECHEMA e.V.
- [12] Profos, P.; Pfeifer, T. (Hrsg.):
„Handbuch der industriellen Meßtechnik“
München/Wien: Verlag Oldenbourg, 1992, 5. Auflage, Seite 745-749. ISBN 3-486-21794-1
- [13] Teufel, M.; Trimis, D.; Lohmüller, A.; Takeda, Y.; Durst, F.:
„Determination of velocity profiles in oscillating pipe-flows by using laser Doppler velocimetry and ultrasonic measuring devices“
In: Flow Measurement and Instrument. (Oxford), Vol.3(1992)2, pp.95-101

*The investigations was carried out in cooperation with the company **Ing.-Büro H. Feurich, 13465 Berlin** and students of the **Fachhochschule Erfurt (Forschungsbereich Versorgungstechnik, Lehrgebiet Sanitärtechnik)** and with support of the company **Wofferts & Wittmer, 12249 Berlin**. The authors are responsible for the scientific content of of the report.*

FÜLLSTANDSMESSUNG AUF DER BASIS DER DETEKTION INTERNER GAMMASTRAHLUNGSQUELLEN [FMDIG]

ANWENDUNG NEURONALER NETZE ZUR FÜLLSTANDSMESSUNG AN KERNREAKTOREN

R. Hampel, F. Dräger

„Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik“ (IPM)
an der „Hochschule für Technik, Wirtschaft und Sozialwesen Zittau/Görlitz(FH)“

D - 02763 Zittau, Theodor-Körner-Allee 16

Tel: +49-(0)3583-61-1383, Fax: +49-(0)3583-61-1288

Tel: +49-(0)3583-61-1545, Fax: +49-(0)3583-61-1288

E-mail:hampel@novell1.ipm.htw-zittau.de

E-mail:draeger@novell1.ipm.htw-zittau.de

1 Einleitung

Die Füllstandsmessung an Siedewasserreaktoren ist von höchster Priorität für die sichere Betriebsführung der Reaktoranlage. Gegenwärtig wird in allen Reaktoranlagen das Füllstandssignal aus einer hydrostatischen Differenzdruckmessung abgeleitet. Ausgehend von einem Grundprinzip der Reaktorsicherheit, welches für sicherheitsrelevante Prozeßgrößen eine diversitäre Meßwerterfassung fordert, wird seit langer Zeit weltweit an der Entwicklung diversitärer Füllstandsmeßverfahren gearbeitet. Im Gegensatz zu den meisten anderen vorgeschlagenen diversitären Verfahren kann bei der Füllstandsmessung auf der Basis der Detektion interner Gammasahlung auf konstruktive Veränderungen und Einbauten am Reaktordruckgefäß verzichtet werden. Zur Rekonstruktion des Füllstandssignales aus den Sensorsignalen kommen neuro-fuzzy Methoden zu Anwendung.

2 Hydrostatische Füllstandsmessung in Druckbehältern

Die Bestimmung des Füllstandes beruht auf der Messung des Differenzdruckes zwischen einer konstanten Vergleichssäule und der im Behälter anstehenden Wasser-Dampfsäule. In den zu untersuchenden Behältern liegen Siedebedingungen vor. Bei transienten Vorgängen kommt es im Behälter und in den Impulsleitungen relativ leicht zu Dichteänderungen, welche die Füllstandsanzeige erheblich verfälschen. Der angezeigte Füllstand entspricht der Dichte in der Vergleichssäule und somit dem Massenfüllstand zwischen den Einbindungen. Durch nachgeschaltete Korrektionsverfahren, wie z.B. Modellgestützten Meßverfahren, wird es möglich, den Gemischfüllstand in einem Zweiphasenmedium zu bestimmen. Der Gemischfüllstand kann durch ein hydrostatisches Füllstandsmeßsystem nicht direkt angezeigt werden.

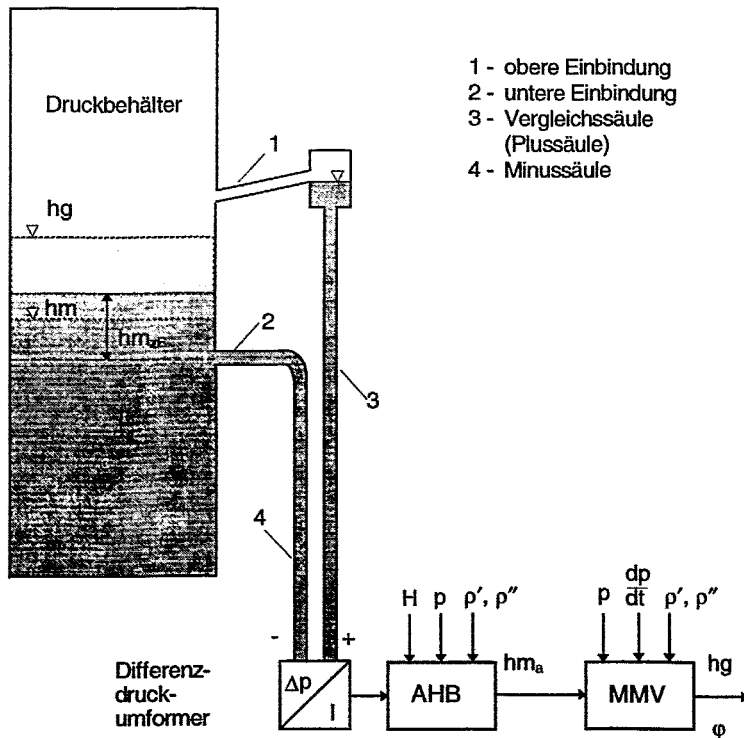


Bild 1: Bestimmung des Füllstandes an Druckbehältern

3 FMDIG - das Meßprinzip

Das Meßprinzip nutzt die folgenden physikalischen Effekte:

- die prompte und verzögerte Gamma-Strahlung der Spaltzone
- die Gammastrahlung des N_{16} im Wasser
- die abschirmenden Eigenschaften des Wassers

Die von den Strahlungsquellen ausgehende Strahlung wird durch eine Meßlanze, in der mehrere Gammadetektoren vertikal angeordnet sind, erfaßt (Bild 2). Für die Auswertung der Meßsignale sind zwei Betriebssystemsituationen zu unterscheiden.

- Der leistungslose Reaktor

In diesem Zustand dominiert die Strahlung der Spaltzone. In Abhängigkeit vom Füllstand, also der Dicke der Abschirmung, wird der Strahlendurchgang mehr oder weniger behindert, so daß sich im Meßsignal der Füllstand widerspiegeln muß. Die Strahlung der Einbauten und deren abschirmende Wirkung ist zeitlich konstant und korreliert nicht mit dem Füllstand.

- Der Reaktor im Leistungsbetrieb

Beim Leistungsbetrieb bildet sich im Inhaltswasser das Isotop N_{16} . Aufgrund der Dichteunterschiede zwischen Wasser und Dampf ist auch die Teilchendichte für N_{16} unterschiedlich. Diese unterschiedliche Teilchendichte bildet sich im Meßsignal ab. Die Strahlung der Spaltzone stellt ein Störsignal dar.

In beiden Betriebssituationen ergeben sich füllstandsabhängige charakteristische Verteilungen der Gammaintensität am Detektorort.

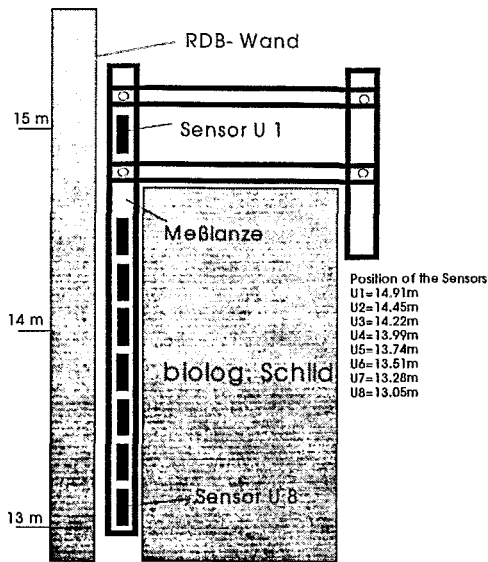


Bild 2: Anordnung der Meßblanze am Reaktor

Die Verfahrensentwicklung und der Test des FMDIG-Systems erfolgte in 3 Etappen.

- Test am Zittauer Lehr- und Forschungsreaktor
- Test am Reaktor des Kernkraftwerkes Brunsbüttel bei abgeschalteten Reaktor
- Test am Reaktor des KKB bei Leistungsbetrieb

Der Funktionnachweis konnte in allen 3 Etappen erbracht werden.

Im Rahmen der Tests wurden folgende für die Signalverarbeitung wichtigen Erkenntnisse gewonnen:

- Die Sensorsignale und die aus den Signalen errechneten Formfunktionen korrelieren eindeutig mit dem Füllstand im Ringraum.
- Die Betriebsparameter (Reaktorleistung, Pumpendrehzahl, Steuerstabstellung, Füllstand Ringraum, Füllstand Plenum und der Füllstand im Bypass) beschreiben den Zustand des Reaktors in eindeutiger Korrelation.

4 Signalverarbeitung mittels Neuro-Fuzzy-Methoden

Für die Rekonstruktion des Füllstandssignales bei abgeschalteten Reaktor wurden Experimente mit größeren Füllstandsbewegungen durchgeführt. Hierbei kamen deterministische als auch neuro-fuzzy Methoden zur Anwendung. Es konnte nachgewiesen werden, daß die Füllstandsinformation basierend auf dem eingangs beschriebenen physikalischen Prinzip, im Meßsignal enthalten ist. Die Gradienten der berechneten Formfunktionen korrelieren eindeutig mit dem Füllstandssignal und können durch ein Polynom 3. Grades beschrieben werden (Bild 4).

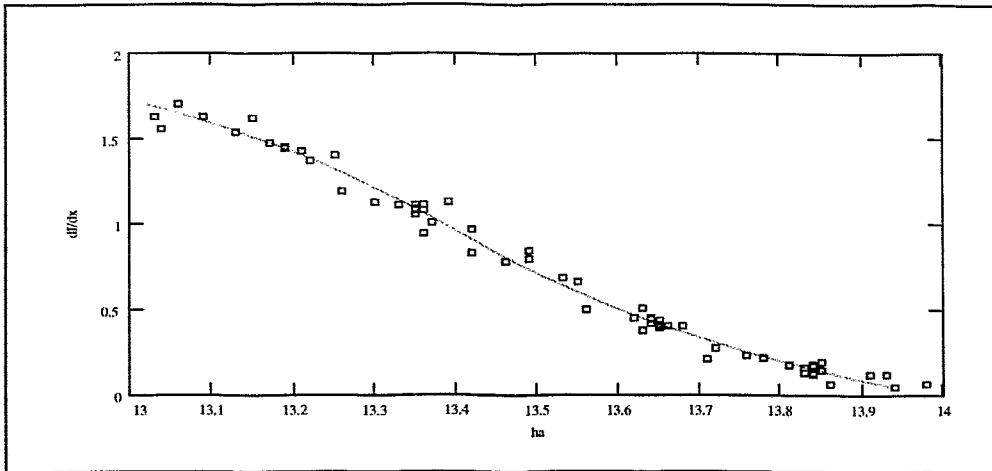


Bild 4: Darstellung des Zusammenhanges Gradienten der Formfunktion und Füllstand im RDB bei abgeschalteten Reaktor

Für die Entwicklung eines Algorithmus auf der Basis Neuronaler Netzes wurde davon ausgegangen, daß die Füllstandsinformation, welche in den n-Detektorsignalen enthalten ist, reproduziert werden kann. Für 8 Sensoren würde das bedeuten, daß die Information im 8 dim. Raum abgelegt ist, wenn jeder Sensor relevant ist.

Durch Normierungsrechnungen in der Vorverarbeitung reduzieren sich die für die Verarbeitung relevanten Signale um 1. Es entsteht ein n-1 dim. Problem. Gesucht ist eine Funktion, die den Zusammenhang der n-1 Detektorsignale zum Füllstand herstellt. Eine Lösung dieses Problems wurde durch den Einsatz neuronaler Netze ermittelt. Der entwickelte Algorithmus, ein dreischichtiges Netz, welches mittels Backpropagation Lernverfahren trainiert wurde, hat sich als in hohem Maße genau und flexibel erwiesen.

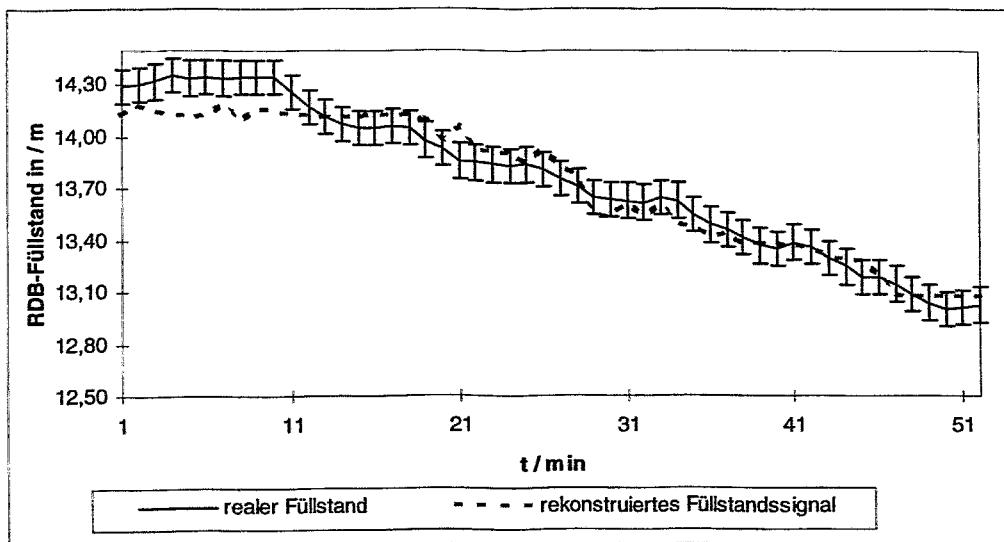


Bild 5: Vergleich des realen Füllstandes mit dem mittels neuronalen Netz ermittelten Füllstand

Die zu approximierende Funktion konnte in relativ kurzer Zeit berechnet werden. Die in der Literatur oftmals kritisierte lange Konvergenzzeit des Verfahrens konnte nicht bestätigt

werden. Selbst bei angenommenen hohen Lernzeiten, würde die Leistungsfähigkeit einer solchen universellen Approximation für sich sprechen. Der entwickelte Algorithmus wurde einer Sensibilitätsanalyse unterzogen. Dabei wurden dem Netz Datensätze präsentiert, welche es vorher nicht gesehen hatte. Des weiteren wurde das Netz mit verrauschten und unvollständigen Datensätzen getestet. Für den abgeschalteten Reaktor konnten dabei die in Bild 5 dargestellten Rekonstruktionsergebnisse erzielt werden. Die Ergebnisse der Sensibilitätsanalyse haben gezeigt, das daß Verfahren robust gegenüber verrauschten und unvollständigen Datensätzen ist.

Die Rekonstruktion des Füllstandssignales bei Reaktorleistungsbetrieb stellt ein ungleich komplexeres Problem für die Signalauswertung dar. Der Reaktorfüllstand wird nun als Systemparameter des Systems Siedewasserreaktor betrachtet. Es wird davon ausgegangen, daß sich der Parameter RDB-Füllstand bei jeder Änderung der Parameter Neutronenfluß, Dampfmenge, Pumpendrehzahl, Steuerstabbewegung ebenfalls determiniert ändert.

Die beschriebenen Prozeßparameter werden dem neuronalen Netz als Zusatzinformation angeboten.

Der funktionelle Zusammenhang Prozeßparameter, Gammasignale und Füllstand wird durch ein n-dim. Kennfeld beschrieben worin die Füllstandsinformation für jeden Prozeßzustand abgelegt ist. Dieses n-dim Kennfeld wird in die Struktur eines neuronalen Netzes abgelegt. Dabei sind zwei Phasen zu unterscheiden.

Die Lernphase: (Bild 6) Hier wird dem Netz zyklisch der vorbereitete Lerndatensatz präsentiert. In dieser Phase hat das Netz Gelegenheit, seine freien Parameter(die Gewichte) an die Lernaufgabe derart zu adaptieren, das daß Problem zufriedenstellend gelöst werden kann. Die Netzwerkstopologie, die Lernraten und weitere Parameter des Netzes werden vom Entwickler festgelegt und beruhen auf Erfahrungswerten. Es ist darauf zu achten, daß alle möglichen Betriebssituationen innerhalb des Lerndatensatzes berücksichtigt werden und das Netz nicht übertrainiert wird. Ab einem bestimmten Punkt ist eine Verbesserung des Lernens nur noch auf Kosten der Generalisierungsfähigkeit möglich.

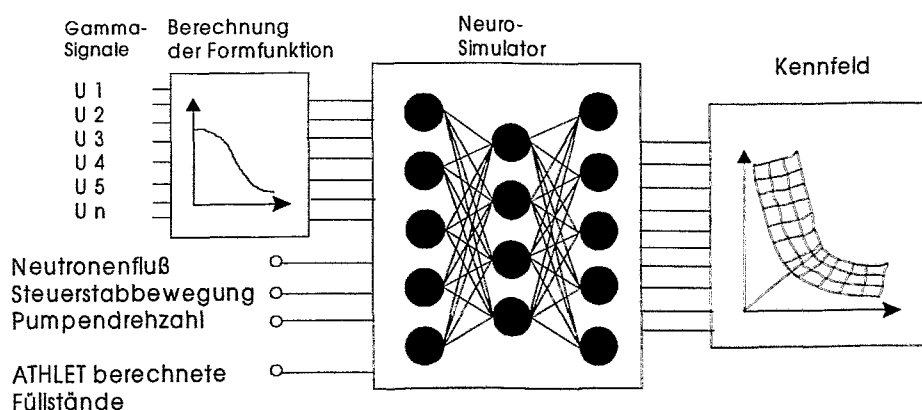


Bild 6 : Darstellung der Lernphase zur Implementierung des Kennfeldes $\text{Füllstand} = f(\text{Gamma}, \text{Prozeßgrößen})$ in die Struktur eines neuronalen Netzes.

Arbeitsphase: Bevor der entwickelte Algorithmus in eine Anwendung eingebunden werden kann, muß er mehrfach mit realen Prozeßdaten getestet werden. Weiterhin ist zu überprüfen, wie der Algorithmus in Störfallsituationen reagiert. Für die Füllstandsrekonstruktion präsentiert sich die Online Einbindung in den Prozeß, wie in Bild 7 dargestellt. Als Inputsignale werden die vorverarbeiteten Gammasignale und die genannten Prozeßgrößen verwendet. Aus diesen Signalen werden die zugehörigen Füllstände berechnet. Im Algorithmus sind die dazu notwendigen Kennfelder für die Prozeßvariablen mit hinterlegt.

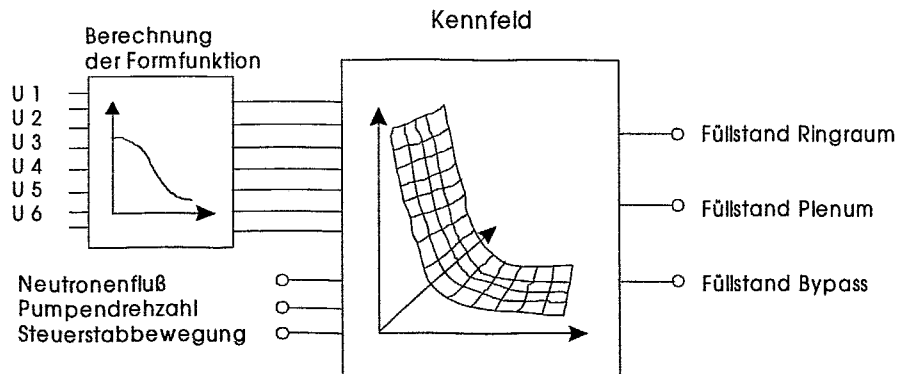


Bild 7 : Bestimmung des Füllstandes aus den eingehenden Gammasignalen und zusätzlichen Prozeßinformationen

5 Zusammenfassung

Die verbesserte Überwachung des Betriebes von Kernkraftwerken erfordert den Einsatz neuer Technologien in der Signalverarbeitung. Zur Gewinnung von Informationen aus hochkomplexen Signalfeldern bieten sich neuronale Netze sowohl für die Extraktion von Information als auch für die Speicherung und schnelle Bereitstellung dieser Information an.

In diesem Beitrag wurde ein Verfahren zur Füllstandsbestimmung an Siedewasserreaktoren vorgestellt, welches in der Lage ist, den Füllstand aus der Messung der Intensitätsverteilung des Gammastrahlungsfeldes außerhalb des Reaktordruckbehälter zu bestimmen. Die Untersuchungen einer umfangreichen Sensibilitätsanalyse ergaben, daß der entwickelte neuronale Algorithmus für den abgeschalteten Reaktor sehr genaue Ergebnisse liefert und robust gegen Störungen ist. Die Arbeiten für die Erstellung des Kennfeldes für den Leistungsbetrieb sind noch nicht abgeschlossen.

Literatur

[1] Dräger, F. : „Untersuchungen zu einem diversitären Füllstandsmeßverfahren“
Diplomarbeit TH Zittau 1996

RADARSENOR ZUR GASDETEKTION IN FLÜSSIGKEITEN

Christian Kunze

*MicAS Elektronik GmbH & Co. KG
Sensor-Systeme
Oelsnitz i.E.*

1. Einleitung

Radarsensorik ist ein relativ neues und vielversprechendes Instrument zur Überwachung von Betriebszuständen an Anlagen und Behältern, zur Schwingungs- und Bewegungsmessung sowie zur Prozeßautomatisierung und -kontrolle. Dies ist vor allem einigen gegenüber konventionellen Sensoren vorteilhaften Eigenschaften der mikrowellenbasierten Sensorik zu verdanken:

- Berührungslosigkeit
- Wartungsfreiheit
- teilweise große Abstände zwischen Sensor und Meßobjekt
- Unabhängigkeit von und Unempfindlichkeit gegenüber Umgebungslicht, Lärm, Luftbewegungen, Staub, Nebel u.a.

Der typische Wellenlängenbereich eines Radarsensors liegt zwischen 1mm und 10cm (entsprechend einem Frequenzbereich von 3 GHz bis 300 GHz). In diesem Wellenlängenbereich sind z.B. Kunststoffe, Stein und Beton, Keramik durchsichtig, Wasser, wäßrige Lösungen, Alkohol und andere Flüssigkeiten hingegen nahezu undurchlässig.

Als Trägersignal für Sensorik haben Mikrowellen vor allem dort ihren Platz, wo auch die beobachteten Objekte Ausdehnungen im Millimeter- und Zentimeterbereich besitzen. Im allgemeinen arbeitet die Radar-Sensorik mit kohärenten Wellen, d.h., auch Phasendifferenzen zwischen ausgesandtem und reflektiertem Signal können zur Gewinnung von Informationen verwendet werden.

Dies bringt neben Vorteilen auch Komplikationen mit sich. Auf der einen Seite steht der hohe Informationsgehalt von Amplituden und Phasen. Andererseits ist die Wellenmechanik an Objekten in der Größenordnung des Trägersignals außerordentlich unhandlich. Effekte wie Beugung und Streuung lassen sich nicht auf einfache Grenzfälle reduzieren.

Die Detektion von Blasen mit Mikrowellen hat ihren Ursprung in der berührungslosen Überwachung von Strömungsprozessen an industriellen Anlagen, bei denen das Auftreten von Blasen ein Hinweis auf nichtbestimmungsgemäße Betriebszustände ist.

Da Wasser und die meisten Flüssigkeiten für Mikrowellen undurchlässig sind, wird eine Blase als räumliche Inhomogenität mit gegenüber ihrer Umgebung veränderten Streueigenschaften als Rückstreusignal, nicht jedoch als Transmissionsignal durch den Radarsensor wahrgenommen.

Damit ist die Beobachtung der Blasen auf wandnahe Schichten begrenzt (Bild 1). Um Blasen sicher zu detektieren, ist deshalb der Sensor vorzugsweise an geneigten Gefäßwänden anzubringen.

Dieser Beitrag stellt Überlegungen zur Anwendung der Radarsensorik bei der qualitativen Analyse von Zweiphasen-Strömungsvorgängen vor. Dazu folgen nach einer kurzen Einführung in die Wirkungsweise der Doppler-Radar-Sensorik (Kapitel 2) die Ergebnisse von Laboruntersuchungen an einzelnen Blasen (Kapitel 3) und an kontinuierlichen Blasenströmungen (Kapitel 4). Kapitel 5 gibt eine Zusammenfassung und einen Ausblick.

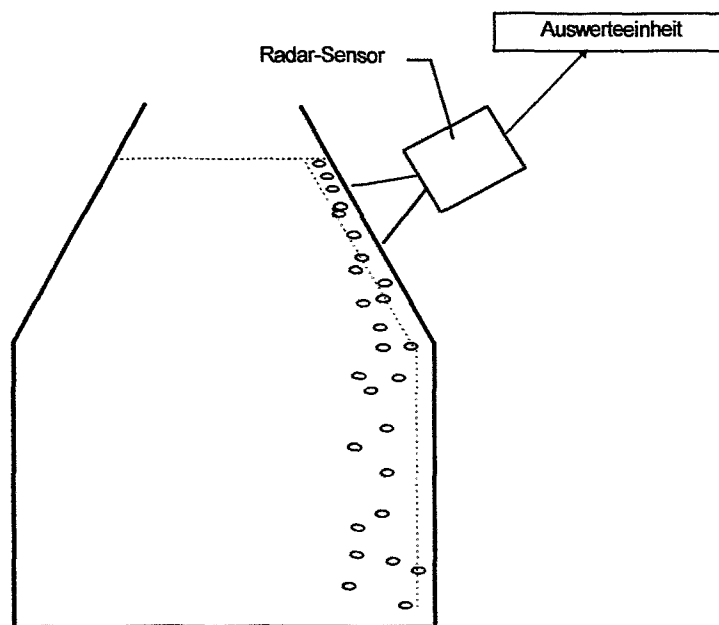


Bild 1: Radar-Sensor zur Detektion von Blasen in Tanks und Rohrleitungen (rote Linie: Randschicht bzw. Eindringtiefe der Mikrowelle in der Flüssigkeit)

2. Prinzip des Doppler-Radar-Sensors

Radarsensoren, wie sie sich in industriellen und technischen Anwendungen durchgesetzt haben, und wie sie auch für die hier diskutierten Versuche eingesetzt wurden, beruhen auf der Ausnutzung des Doppler-Effektes.

In einem Doppler-Modul wird die gesendete Welle mit der von einem Objekt rückgestreute Welle an einem nichtlinearen elektronischen Bauelement (i.d.R. einer Diode) gemischt. Die hinlaufende Welle der Form

$$\cos(kx - \omega t + \varphi)$$

wird am Ort $x(t)$ eines i.a. bewegten Objektes als Signal der Form

$$A(\underline{x}(t)) \cos(k [x(0) + \int_0^t dt' (\underline{n}, \underline{v}(t'))] - \omega t + \varphi)$$

empfangen und zum Empfänger zurückgestreut. $(\underline{n}, \underline{v})$ ist das Skalarprodukt aus Wellennormale und Geschwindigkeitsvektor des Objektes, $k = 2\pi/\lambda$, und $A(\underline{x}(t))$ ist die Ausbreitungsfunktion der Wellen zwischen Sender und Objekt am Ort $\underline{x}(t)$.

Aus der nichtlinearen Mischung beider Signale entsteht ein Signal der Form

$$|A(\underline{x}(t))|^2 |f(\theta=\pi)| \cos(2 k [x(0) + \int_0^t dt' (\underline{n}, \underline{v}(t'))]) \quad (1),$$

wobei f die Streuamplitude des beobachteten Objektes ist. Der Faktor 2 stammt aus Hin- und Rücklauf der Welle. Zu beachten ist weiterhin, daß auch die Streueigenschaften des Objektes von Ort und Zeit abhängen können.

Beispielsweise zeigt eine an der Gefäßwandung aufsteigende Blase Oszillationen ihrer Form, die sich als zusätzliche Anteile im Frequenzspektrum des Sensorsignals äußern.

Bei einer Relativbewegung des Objektes mit einer konstanten Geschwindigkeit v im Winkel θ zur Wellennormalen entsteht somit das bekannte Dopplersignal mit der Frequenz

$$f_D = 2 k v \cos \theta = 2 v f_T \cos \theta / c$$

Das Dopplersignal einer Blase, die sich am Sensor vorbeibewegt, ist eine Überlagerung einer orts- (und damit zeitabhängigen) Ausbreitungsfunktion $A(x)$ der Welle vom Sensor zur Blase und der durch die Mischung von hin- und rücklaufenden Welle stammenden, schnell oszillierenden Zeitfunktion $\cos(\dots)$ entsprechend Ausdruck (1).

3. Zeitsignale einzelner Blasen

Zunächst ist es interessant, die im Dopplermodul entstehenden Zeitsignale einzelner Blasen zu untersuchen. Der entsprechende Versuchsaufbau ist in Bild 2 dargestellt. Durch unterschiedliche Neigungen des Kunststoffrohres verändert sich die Geschwindigkeit der aufsteigenden Blasen.

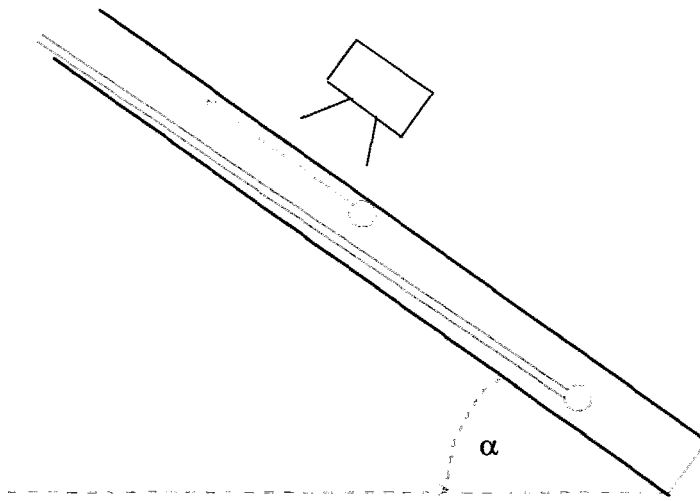


Bild 2: Versuchsaufbau zur Messung an einzelnen Blasen
 Einzelne Luftblasen werden mit einem dünnen Schlauch erzeugt und steigen an der Innenwand der Säule auf.
 Der Neigungswinkel α
 beeinflusst im Versuch die Geschwindigkeit der Blasen.

Die Messungen wurden mit Wasser für zwei Neigungen (30° und 60°) sowie eine zähflüssige Vergußmasse bei 60° Neigung durchgeführt.

Die Blasen wurden in unseren Versuchen mit einem Röhrchen in einer Kunststoffflasche "mundgeblasen"; weder die Blasengröße (und damit die Aufstiegsgeschwindigkeit) noch der Verlauf ihrer Bahnkurve oder ihre Eigenschwingungen waren deshalb exakt reproduzierbar.

Die Kurvenverläufe für jede einzelne Blase zeigen deshalb teilweise erhebliche Unterschiede, die im wesentlichen auf folgende Faktoren zurückzuführen sind:

- Form der Bahnkurve: undulierende Bahnkurven verändern das Oberwellenspektrum, Winkel der Bahnkurve zur Wellennormalen bestimmt Symmetrie des Dopplersignals
- Abstand der Bahnkurve vom Sensor: verändert den Kurvenverlauf am Symmetriemittelpunkt des Dopplersignals
- Eigenschwingungen der Blase: verändern das Oberwellenspektrum des Dopplersignals
- Größe der Blase: Abmessungen der Blasen sind von der Größenordnung der verwendeten Wellenlänge, wodurch ein Teil der Blasen wie Hohlraumresonatoren wirkt

Bedingt durch die starke Richtwirkung der verwendeten Hornstrahler oder planaren Front-Ends erzeugt die Blase nur in einem schmalen Fenster vor dem Sensor ein Signal, d.h., die Hüllkurve ist im Zeitbereich eng lokalisiert.

Einige gemessene Dopplersignale sind in den Bildern 3a bis d dargestellt.

Der Versuch, aus den Dopplersignale einzelner Blasen eindeutige Rückschlüsse auf Parameter wie Größe, Geschwindigkeit oder Form und Verlauf der Bahnkurve zu ziehen, erscheint mit Blick auf die Vielzahl von Einflüssen fast aussichtslos. Dies gilt umso mehr für das Zeitsignal, das aus dem Strömungsbild vieler Blasen gewonnen wird.

4. Messungen an der Zweiphasen-Testschleife

Ein anderer Weg eröffnet sich hingegen mit der spektralen Analyse eines über einen vergleichsweise langen Zeitraumes gewonnenen Dopplersignals. "Lang" bedeutet in diesem Zusammenhang, daß alle relevanten Ereignisse (Einzelblasen, Pfropfen) hinreichend oft vorkommen, um daraus eine "gute" Statistik zu gewinnen.

Bei den Meßreihen an der Zweiphasen-Testschleife des FZR betrug der Meßzeitraum 5 Sekunden. Der Frequenzbereich wurde (möglicherweise etwas voreilig) auf 1000 Hz begrenzt.

Ziel der Messungen war es herauszufinden, ob aus den Spektren der Radar-Dopplersignale Rückschlüsse auf den jeweils vorliegenden Strömungszustand (Blasen-, Pfropfen-, Schaumströmung) gezogen werden können.

Bei den Versuchen wurden daher verschiedene Strömungszustände anhand der Flow Map nach Taitel & Dukler angefahren. Die Leerrohrgeschwindigkeit von Wasser betrug bei allen Messungen konstant 0,1 m/s; die Leerrohrgeschwindigkeit der Luft wurde stufenweise erhöht:

Tabelle 1: Gemessene Strömungszustände an der Zweiphasen-Testschleife

Bezeichnung des Strömungszustandes	Leerrohrgeschwindigkeit der Luft in m/s	Punkt der Testmatrix der Zweiphasen-Testschleife
Blasenströmung	2,6E-3	3
	1,6E-2	47
	6,0E-2	80
	9,0E-2	91
Pfropfenströmung	1,5E-1	102
	2,1E-1	113
	3,5E-1	124
	5,5E-1	135
	8,5E-1	146
Schaumströmung	1,3	157
	2,1	168
	3,5	179
	5,0	190
	12	212
Grenze zur Ringströmung	12	212
Vergleichsmessung o. Luft	--	--

Es wurden an jedem Testpunkt drei Messungen à 5 Sekunden aufgenommen.

Die nachfolgende Auswertung der Spektren kann aus den oben genannten Gründen nicht viel mehr als eine verbale Beschreibung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden sein. Eine physikalische Deutung der Spektren erscheint gegenwärtig jenseits des Machbaren.

Vor diesem Hintergrund besteht das vorläufige Ziel der Untersuchungen auch nur in einer empirischen Suche nach charakteristischen Merkmalen im Spektrum eines Strömungszustandes, die es von anderen Zuständen unterscheiden.

Beispiele für die Dopplerspektren an ausgewählten Meßpunkten sind in den Bildern 4a bis d zu sehen. Dabei fällt zunächst auf, daß die 3 Spektren für jeden Testpunkt sehr genau übereinanderliegen, die Messungen also offenbar gut reproduzierbar sind.

Zum Vergleich wurde eine Messung ohne Luftströmung (Bild 4a) durchgeführt. Daraus ist ersichtlich, daß ein Teil des Signals, vor allem im niederfrequenten Teil des Spektrums, wahrscheinlich aus Schwingungen des Versuchsaufbaus resultiert, die vom Sensor mit hoher Empfindlichkeit wahrgenommen werden. Die für die Blasenströmungen charakteristischen Spektralanteile liegen im wesentlichen oberhalb 300 Hz.

Die Suche nach einem Charakteristikum der Pfropfenströmung führt auf einen Peak bei ca. 590 Hz, der im Gegensatz zur ausgeprägten Blasen- und Schaumströmung fehlt. Der Übergang zwischen den Zuständen ist jedoch anhand dieses Peaks nicht scharf zu lokalisieren.

Der Testpunkt 102 wurde zweimal angefahren, einmal von TP 47 aus, das zweite Mal von TP 80 aus. Der Vergleich beider Spektren zeigt einen auffälligen Unterschied im Frequenzbereich von 300 bis 350 Hz. Ob es sich dabei um einen Hystereseeffekt oder um ein Artefakt handelt, konnte nicht geklärt werden.

Hinzu kommt, daß die Temperatur des Sensors im Verlauf der gesamten Messung durch Erwärmung an der Testscheife von ca. 15 auf 30 °C anstieg. Damit mag eine Veränderung seiner Empfindlichkeit einhergegangen sein (was die Intensität, nicht jedoch die Lage der Peaks im Spektrum verändert.)

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die ersten Versuche an einzelnen Blasen zeigten eine breite Varianz an Zeitsignalen, die von einer Vielzahl von Einflußgrößen hervorgerufen wird. Eine mathematische Beschreibung dieser Effekte für einzelne Blasen erscheint weder sinnvoll noch machbar.

Bei Messungen an Zweiphasenströmungen und der Auswertung der gewonnenen Doppler-Spektren zeigte sich, daß

- die Radar-Sensorik für jeden Punkt der Flow Map reproduzierbare Ergebnisse liefert,

- eine eindeutige Zuordnung der Strömungsregimes zu den Spektren beim ersten Anlauf nicht möglich war.

Denkbare Ursachen für diesen Befund liegen aus unserer Sicht in der Begrenzung des ausgewerteten Spektralbereiches auf 1000 Hz und in der Überlagerung der Signale durch Eigenschwingungen des Meßaufbaus. Aussagekräftigere Ergebnisse lassen sich möglicherweise erzielen, wenn der Sensor geneigt zur Strömungsrichtung (statt senkrecht) angebracht wird. Dies bleibt zukünftigen Versuchen vorbehalten.

Mein Dank gilt Dr. Prasser, Dr. Schaffrath und Dr. Zippe (FZR) für die Möglichkeit, Messungen mit dem Doppler-Radar-Sensor an der Zweiphasen-Testschleife durchzuführen.

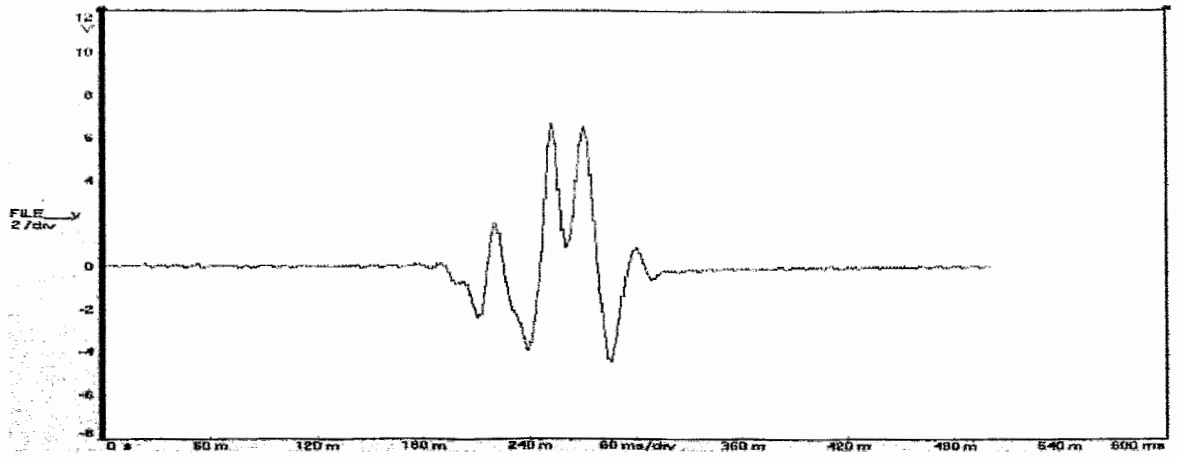


Bild 3a: Doppler-Zeitsignal, Luftblase in Wasser, Neigungswinkel 30°

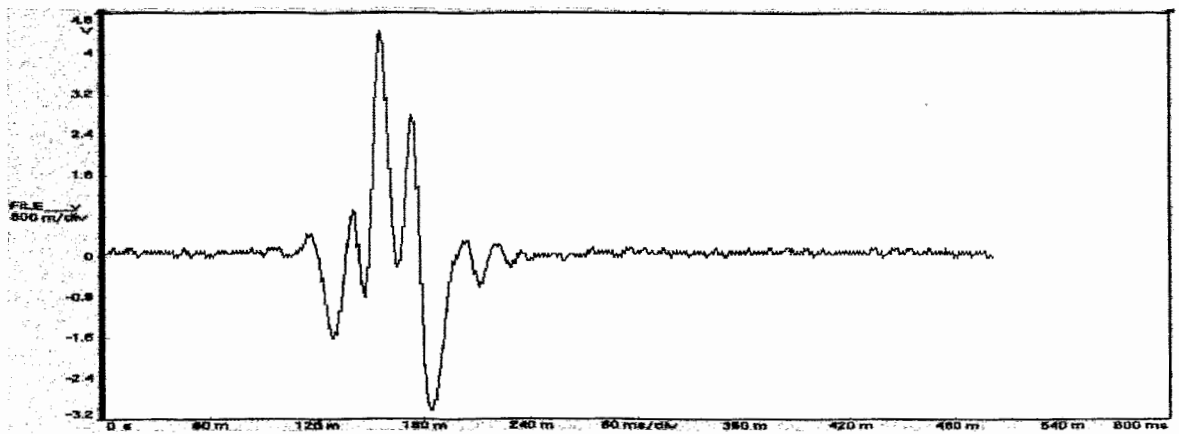


Bild 3b: andere Luftblase in Wasser, Neigungswinkel 30°

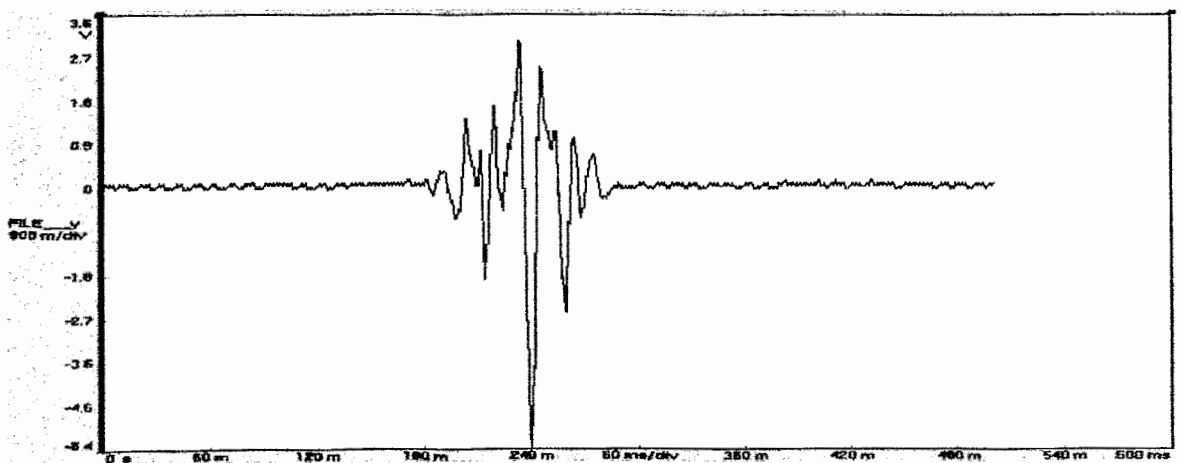


Bild 3c: Luftblase in Wasser, Neigungswinkel 60°

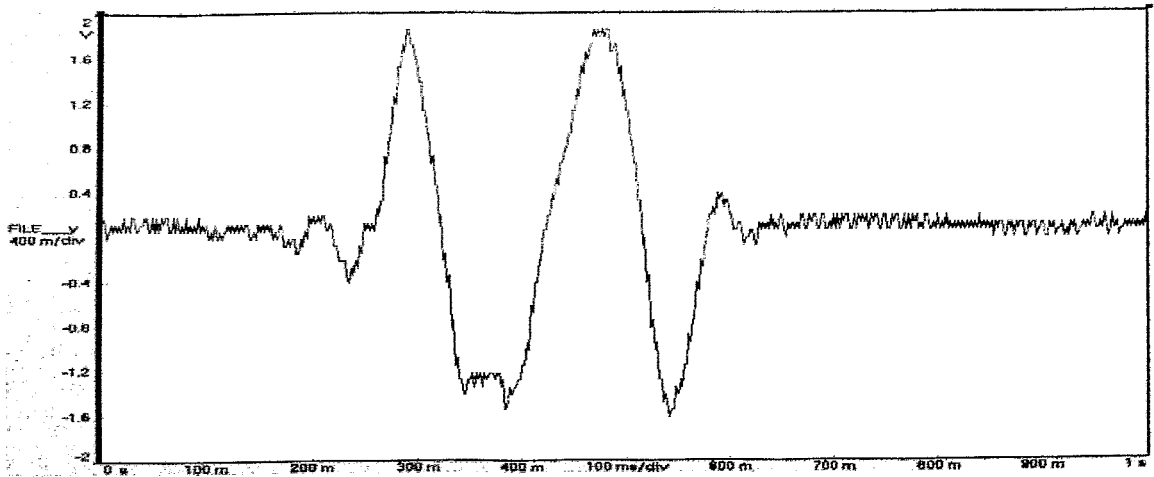


Bild 3d: Luftblase in hochviskoser Vergußmasse, Neigungswinkel 60°
(veränderte Zeitskala gegenüber Bildern 3a-c)

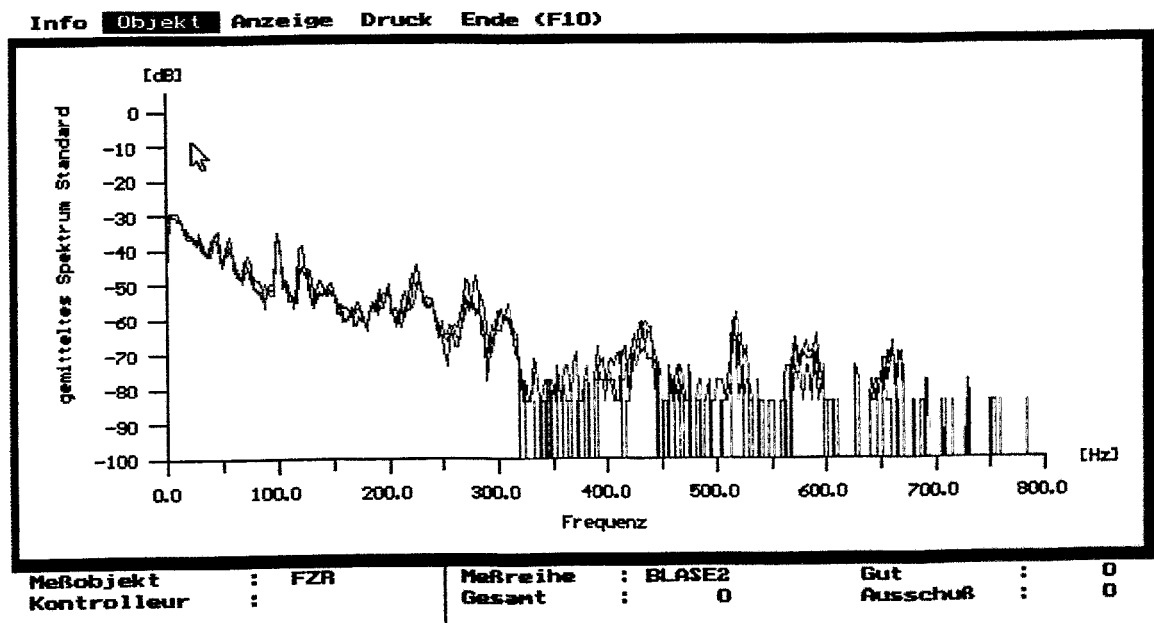


Bild 4: Zweiphasentestschleife, Doppler-Spektren,
4 a: ohne Luft

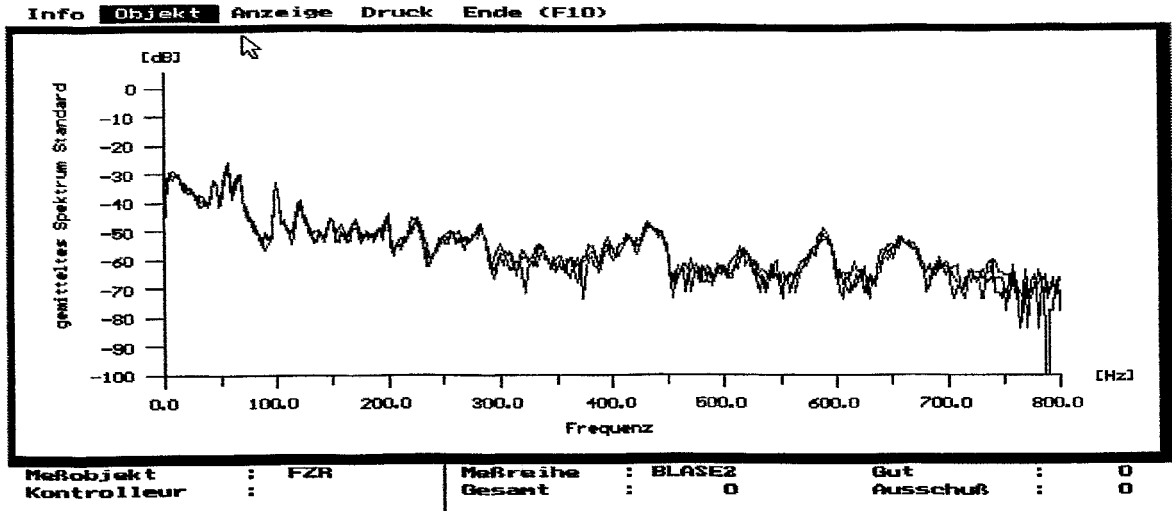


Bild 4b: Spektrum des Dopplersignals, TP 3 (Blasenströmung)

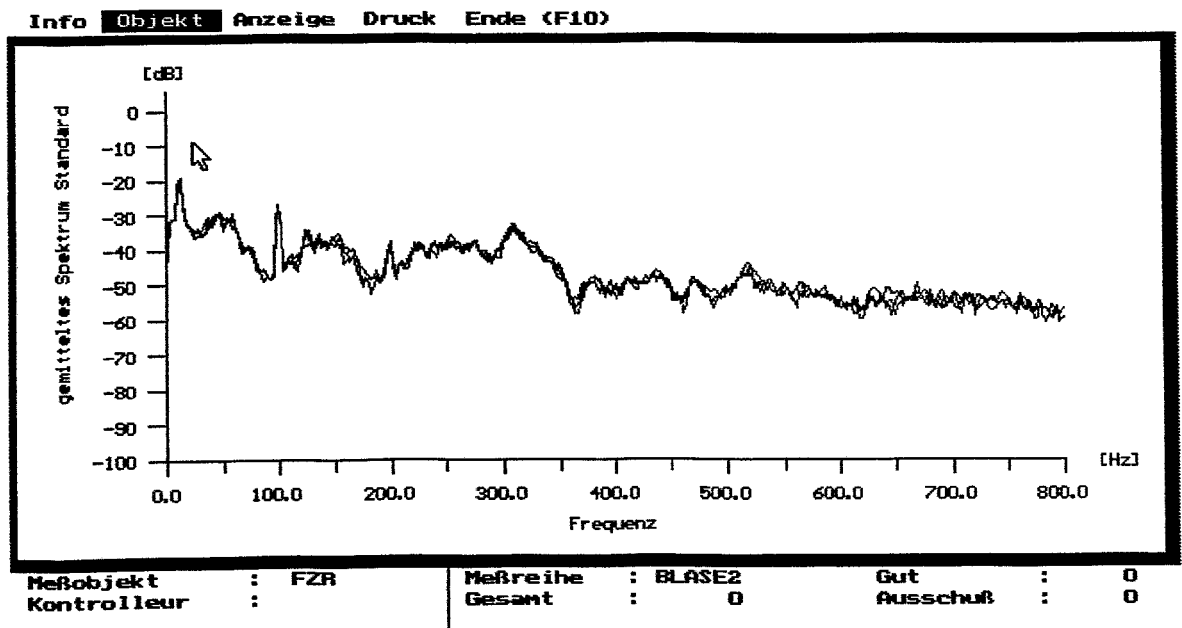


Bild 4c: TP 102 (Pfropfenströmung)

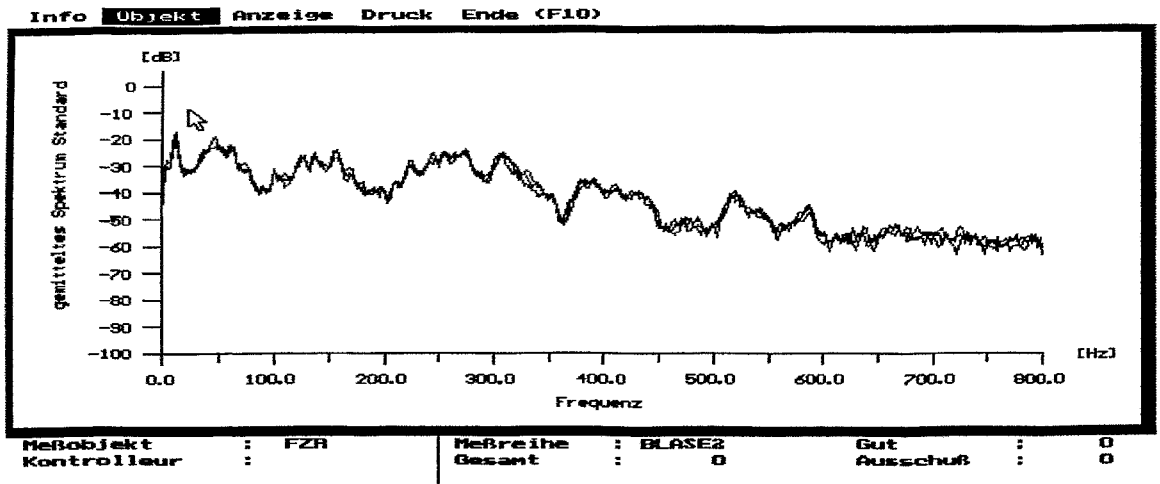


Bild 4d: TP 190 (Schaumströmung)

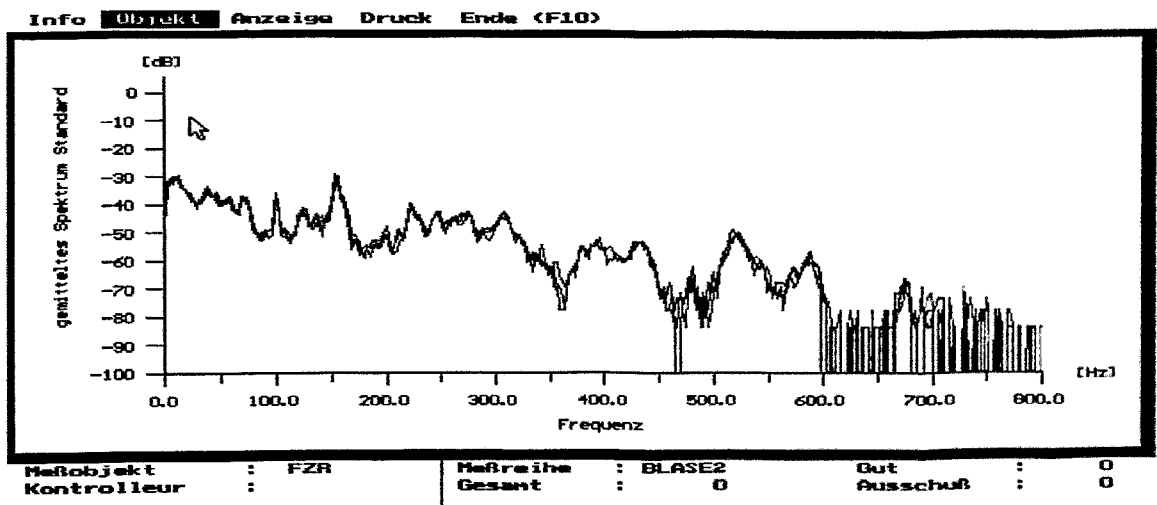


Bild 4e: TP 212 (Grenze Schaumströmung - Ringströmung)

Finite-Volumen Berechnung von Zweiphasenströmungen in Lagrangescher und Eulerscher Beschreibung

Hannes Fogt

*Technikum Joanneum, Fachhochschul-Studiengang Fahrzeugtechnik,
Babenbergerstraße 10, A-8010 Graz,*

Tel: +43 316 76 47 15 21, Fax: +43 316 76 47 15 15, email: Hannes.Fogt@technikum.joanneum.ac.at

Aron Kneer

*Battelle Ingenieurtechnik GmbH,
Düsseldorfer Straße 9, D-65760 Eschborn*

Tel: +49 6196 936 313, Fax: +49 6196 936 399, email: akn@battelle.de

Volker Seidl

*ICCM Institute of Computational Continuum Mechanics GmbH,
Bramfelder Straße 164, D-22305 Hamburg*

Tel: +49 40 69 79 26-30, Fax: +49 40 69 79 26-29

1 Einleitung

Zur Untersuchung und Beurteilung von Zweiphasenströmungen und für die Auslegung strömungsmechanischer Systeme und Komponenten werden neben experimentellen und empirischen Methoden zunehmend numerische Rechenverfahren eingesetzt. Typische Beispiele sind Einspritzsysteme, Zerstäuber, Mischer, Dampferzeuger und Anlagen zur Rauch- bzw. Abgasreinigung.

Den hohen Rechenzeiten, die bei der numerischen Lösung der zwei- und mehrphasigen Erhaltungsgleichungen anfallen, wird häufig durch Vereinfachung der Ansätze entgegengewirkt. In der Energie- und Verfahrenstechnik wird oft auf eindimensionale Rechenverfahren zurückgegriffen. Sie bieten den Vorteil, daß mit ihnen das Verhalten ganzer Anlagen beschrieben werden kann. Die räumliche und zeitliche Auflösung bis hin zur Erfassung kleinskaliger Detailscheinungen gelingt mit diesen Methoden nur bedingt.

CFD Methoden ermöglichen durch die stetig wachsende Leistung der Rechenanlagen und durch Umsetzung neuer mathematisch-informatischer Methoden detaillierte numerische Untersuchungen von zweiphasigen Strömungsvorgängen bei vertretbaren Rechenzeiten. In den nachfolgenden Abschnitten sind Möglichkeiten und Grenzen anhand einiger Beispiele aufgezeigt.

2 Berechnungsmethoden

Für die numerische Berechnung von Mehrphasenströmungen sind zwei Methoden gebräuchlich. Welches Verfahren besser geeignet ist, wird von der Art der Anwendung bestimmt.

2.1 Eulersche Methode

Die Eulersche Methode basiert auf der Beschreibung sämtlicher in einer Mehrphasenströmung enthaltener Fluide als Kontinuum. In einem ruhenden Koordinatensystem

werden – ähnlich wie bei einphasiger Strömung – die Erhaltungsgleichungen für jedes Fluid formuliert. Neben einem Satz von Erhaltungsgleichungen für jede Phase gelangt man zu sogenannten Sprungrelationen, die der diskontinuierlichen Änderung der physikalischen Größen an der Phasengrenze Rechnung tragen.

Die Mittelung dieser Gleichungen führt auf das von Ishii [5] ausführlich dargestellte Zwei-Fluid-Modell. Aufgrund der Annahme, daß beide Phasen als Kontinuum aufzufassen sind, eignet sich das Zwei-Fluid-Modell für die Berechnung von Strömungen, in denen der Dispersphasenanteil hoch ist. Dem volumetrischen Einfluß der zweiten Phase wird durch eine Erhaltungsgleichung für die Volumenfraktion dieser Phase Rechnung getragen.

Neben den Turbulenzgrößen, die aufgrund der begrenzten numerischen Auflösung bereits bei einphasiger Strömungsberechnung mit Modellen beschrieben werden müssen, treten bei diesem Verfahren weitere modellierungsbedürftige Größen in Form der Phasenwechselwirkungsterme und Phasengrenzflächenkonzentration – sie gibt an, wie fein die disperse Phase in der kontinuierlichen verteilt ist – hinzu. Außerdem müssen die aus einphasigen Betrachtungen bekannten Turbulenzmodelle modifiziert werden, um den veränderten Mechanismen gerecht zu werden.

Die Vorhersagefähigkeit des Zwei-Fluid-Modells und der darauf beruhenden numerischen Rechenverfahren wird von der Verfügbarkeit ausreichend genauer Modelle, die nur aus detaillierten Messungen gewonnen werden können, entscheidend mitbestimmt.

2.2 Lagrange Methode

Anders als die Eulersche Methode, die auf der Kontinuumsannahme für beide Fluide beruht, geht die Lagrangesche Methode von der Vorstellung punktförmiger Einzelpartikeln aus, die einer umgebenden Fluidströmung ausgesetzt sind. Das unterschiedliche physikalische Verhalten verschieden großer Teilchen wird durch Aufteilung des Teilchengrößenspektrums in diskrete Einzelklassen berücksichtigt.

Durch Lösung der Bewegungsgleichung in einem mitbewegten Koordinatensystem und stückweise Integration werden die Teilchenbahnen für eine ausreichend große Teilchenzahl berechnet. Im Zusammenwirken mit statistischen Auswertemethoden wird das Verhalten der dispersen Phase ermittelt.

Das Lagrange Verfahren gestattet die individuelle Behandlung einzelner Teilchengruppen. Die fehlende Berücksichtigung volumetrischer Effekte favorisiert den Einsatz dieser Methode für Zweiphasenströmungen mit geringem Dispersphasenanteil.

3 Numerische Lösungsverfahren

Beide möglichen Ansätze verursachen einen im Vergleich zu einphasigen Verfahren erhöhten Rechenaufwand. Bei der Eulerschen Methode ist er mit dem vergrößerten Gleichungssystem und der starken Kopplung zu erklären, die auf vermehrte Rechenschritte während der iterativen Lösung des Gleichungssystems führt. Beim Lagrangeschen Verfahren sind die Bahnkurven einer ausreichend großen Anzahl repräsentativer Teilchen zu berechnen. Ist die Beladung mit Teilchen so hoch, daß Rückwirkungen auf die Fluidströmung erfolgen, müssen Fluid- und Teilchenströmung abwechselnd

unter gegenseitiger Berücksichtigung der Ergebnisse so lange vorgenommen werden, bis beide Phasen ihre endgültige Lösung erreicht haben.

Beide Verfahren können mit parallelen Lösungsansätzen beschleunigt werden. Für die Methode der Gebietszerlegung und verteiltes Rechnen auf mehreren Prozessoren – entweder auf parallelen Hochleistungsrechnern oder auf vernetzten Arbeitsplatzrechnern – wurden bei einphasigen Berechnungen Verringerungen der Rechenzeit um ein bis zwei Größenordnungen nachgewiesen. Die Gebietszerlegung ist auch auf Berechnungen nach der Lagrange Methode anwendbar. Dynamische Konzepte zur Lastverteilung sind dazu erforderlich, weil die Teilchenbahnen a priori nicht bekannt sind. Im Projekt BETES [3] wurden solche Konzepte für die dreidimensionale Berechnung teilchenbeladener Strömungen eingesetzt.

4 Berechnungsbeispiele mit der Euler Methode

4.1 Strömung eines Wasser-Luft-Gemisches in einer plötzlichen Rohrerweiterung

In zwei senkrecht übereinander angeordneten Rohren, die durch eine plötzliche Erweiterung verbunden sind, wurde die Strömung von Wasser-Luft-Gemischen experimentell [1] und numerisch untersucht.

Bild 1 zeigt die berechneten Ergebnisse im Vergleich mit den Experimenten. Die Rohrdurchmesser betragen 50 bzw. 100 mm. Der Gasvolumenstrom lag bei 0.6 l/s, der Volumenstrom der flüssigen Phase bei 3 l/s. Die Berechnung beginnt an der Stelle der plötzlichen Erweiterung; die lokalen Meßwerte für Flüssigkeitgeschwindigkeit und Gasvolumenanteil – er beträgt lokal bis zu 35% – wurden als Randbedingung vorgegeben. Außerdem wurde ein einheitlicher Blasendurchmesser zugrunde gelegt.

Gute Übereinstimmung ist für die mittlere Geschwindigkeit der Flüssigkeitsphase erkennbar (für die Geschwindigkeit der Gasphase existieren keine Meßwerte). Die

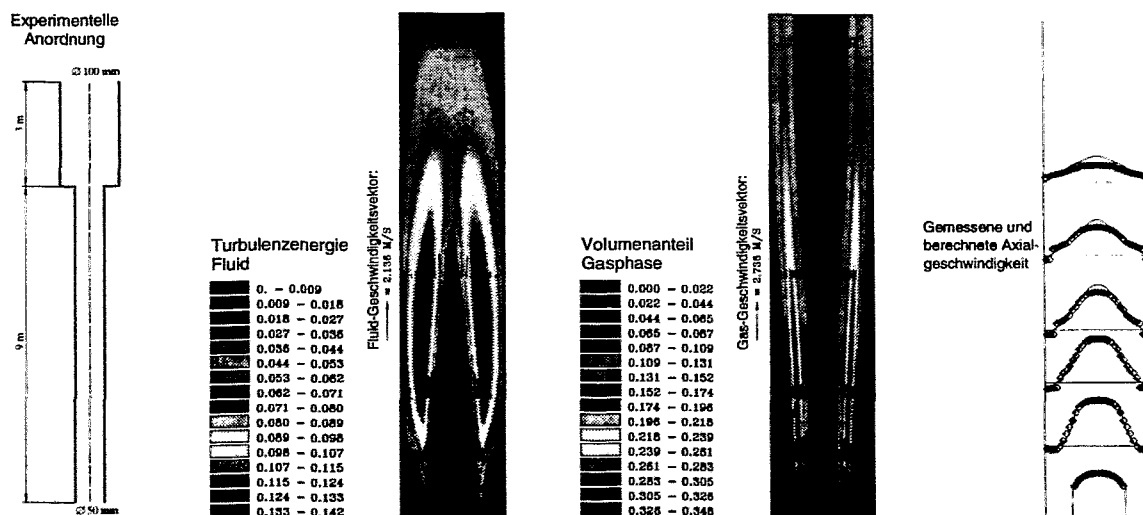


Bild 1: Zweiphasige Strömung eines Wasser-Luft-Gemisches in einer plötzlichen Rohrerweiterung

Ausmischung der Gasphase im großen Rohr erfolgt in den Berechnungen langsamer als im Experiment, was der begrenzten Vorhersagegenauigkeit des Turbulenzmodells zuzuschreiben ist.

4.2 Gasinduzierte Durchmischung eines Behälters

In verfahrenstechnischen Anlagen werden große Mengen reaktiver Substanzen bevorratet. Für den Fall, daß es in den Lagertanks zu einer unerwünschten Reaktion kommt, werden Reaktionsstopper beigemischt. Durch bodennahe Einspeisung von Gas wird eine Durchmischung des Behälters nach dem Prinzip der Mammutpumpe vorgenommen.

Für einen Behälter mit Durchmesser 20 m und einer Spiegelhöhe von 8 m ist die berechnete zeitlich-räumliche Entwicklung des zweiphasigen Strömungsfeldes – Flüssigkeitsdruck und Flüssigkeitsgeschwindigkeit (linker Teil) sowie Gasvolumenanteil und Gasgeschwindigkeit (rechter Teil) – während der ersten zehn Sekunden bei einer Einspeisemenge von $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ in Bild 2 gezeigt [2].

Nach der Anlaufphase nähert sich die Strömungsform allmählich dem stationären Zustand, der in Bild 3 dargestellt ist. Die lokale Erhöhung der freien Oberfläche in der Behältermitte bleibt in der Berechnung unberücksichtigt; ihr entspricht die Erhöhung des statischen Drucks in diesem Bereich. Der Gasvolumenanteil liegt in der Nähe der Einspeisestelle bei nahezu 100%, nimmt wegen der hohen Flüssigkeitsgeschwindigkeiten in vertikaler Richtung aber rasch auf Werte um 15% ab. Die Vertikalgeschwindigkeit erreicht in Behältermitte Höchstwerte um 4 m/s; die für die Verteilung des Inhibitors maßgebliche radiale Geschwindigkeitskomponente liegt im Bereich der freien Oberfläche bei rund 1 m/s.

Nach ausreichend langer Zeit bildet die Flüssigkeit ein großes, torusförmiges Rezirkulationsgebiet, wie die Stromlinienverteilung der Flüssigphase in Bild 3 zeigt. Den Rechenergebnissen zufolge saugt der zweiphasige Strahl über rund 90% seiner Länge Flüssigkeit aus der Umgebung mit gleichbleibender Radialgeschwindigkeit an, was der radialen Ausbreitung des Strahls entgegenwirkt.

Bei Versuchen im Technikumsmaßstab (Durchmesser 1.6 m, Füllhöhe 0.8 m, Gasstrom 0.55 l/s) wurde anstelle des Inhibitors Tracermaterial im Zentrum des Behälters aufgebracht und nach Beginn der Gaseinspeisung die Mischungsgüte an fünf verschiedenen Positionen mit Hilfe von Leitfähigkeitssonden gemessen.

Der Vergleich zwischen Messungen und berechneten Ergebnissen ist in Bild 4 gezeigt. Abweichungen in der Anfangsphase sind darauf zurückzuführen, daß die tatsächliche Strömung nicht – wie in den Berechnungen vorausgesetzt – ideal rotationssymmetrisch ist und die Messungen nur an fünf Stellen durchgeführt werden. Die zeitliche Abhängigkeit der Mischungsgüte – eigentliches Ziel der Untersuchung – wird durch die Berechnungen sehr gut wiedergegeben.

5 Berechnungen mit der Lagrange Methode

Die Lagrange Methode ist grundsätzlich gut geeignet für die Beschreibung teilchenbeladener Strömungen, bei der die größenabhängige Unterteilung der Partikeln in eine Reihe diskreter Klassen erforderlich ist, um den individuellen Eigenschaften verschiedenen großer Teilchen Rechnung zu tragen [6].

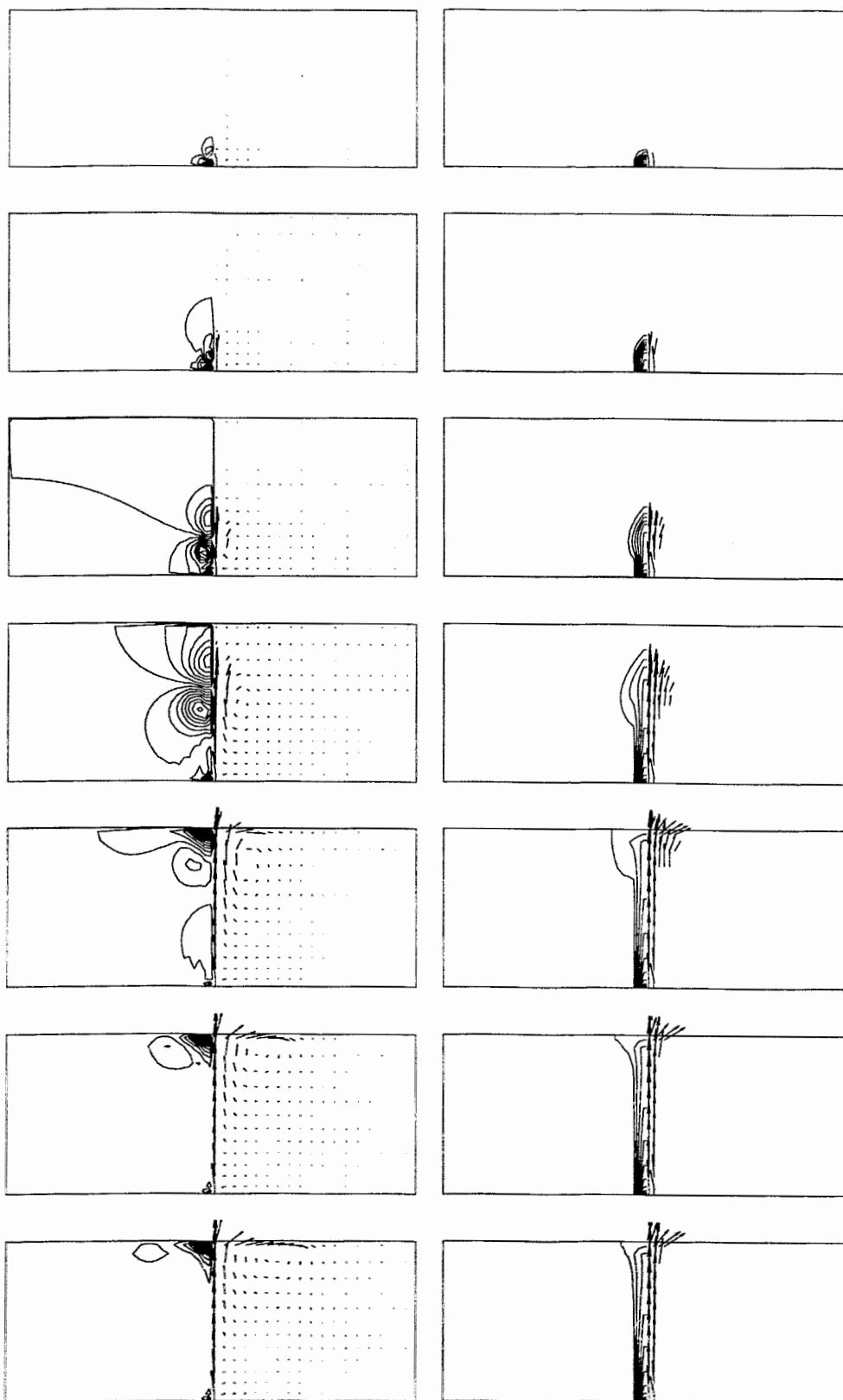


Bild 2: Durchmischung eines Lagertanks durch bodennahe Gaseinspeisung: zeitlich-räumliche Entwicklung von Druck und Flüssigkeitgeschwindigkeit (links) bzw. Gasvolumenanteil und Gasgeschwindigkeit (rechts), $t = 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10$ s

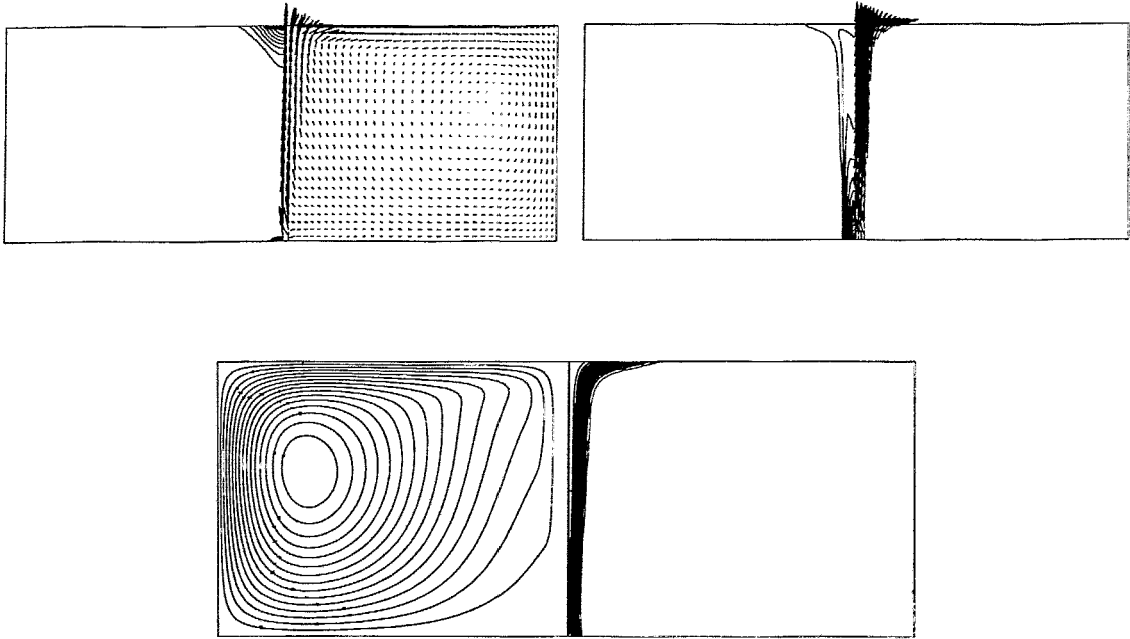


Bild 3: Stationäre Lösung: Statischer Druck und Flüssigkeitgeschwindigkeit (links), Gasvolumenanteil und Gasgeschwindigkeit (rechts), Stromlinien für Flüssigkeits- und Gasphase (unten).

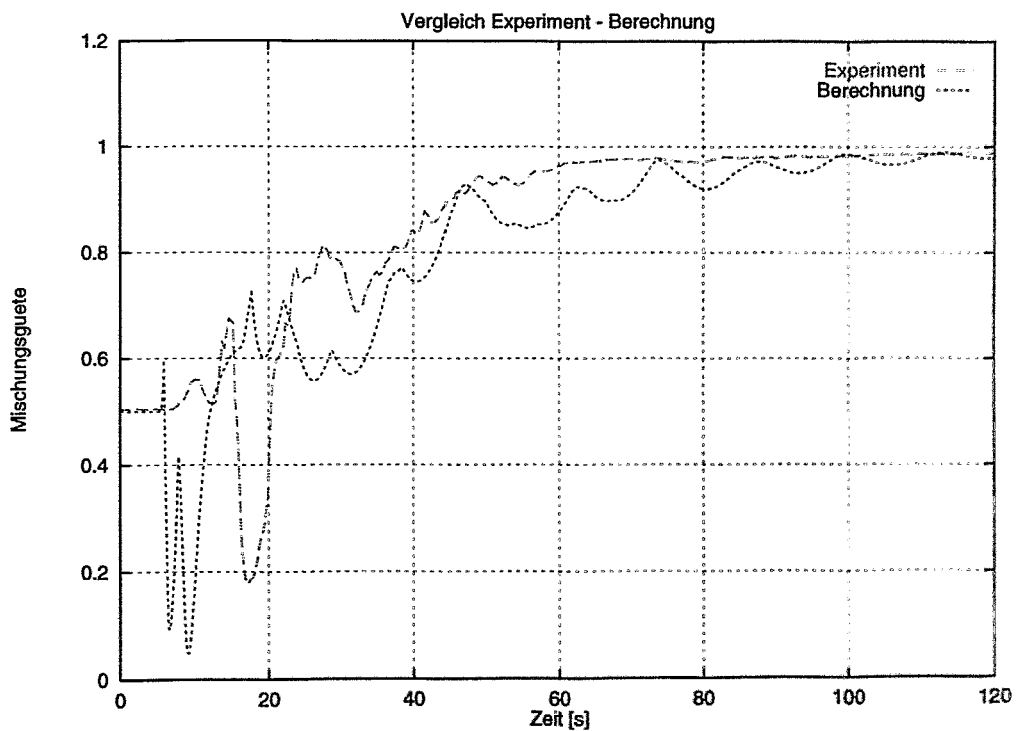


Bild 4: Vergleich von gemessener und berechneter Mischungsquote (Meßdaten mit freundlicher Genehmigung BASF)

5.1 Staubverteilung in einem pneumatisch befüllten Silo

Turbulenz und Teilchenkonzentration in Staubwolken sind entscheidende sicherheitstechnische Parameter für die Vorhersage der Heftigkeit von Staubexplosionen in der industriellen Praxis. Beispiele sind Betriebe der Lebensmittelverarbeitung, Räumereienanlagen, Wirbelschichttrockner etc.

Zur Klassifizierung des Gefährdungspotentials wurden an einem pneumatisch mit Maisstärke befüllten 12 m^3 großen Silo (Bild 5) mit laseroptischen Meßverfahren die Teilchengeschwindigkeit, die Turbulenz und die Staubkonzentration bestimmt [4].

Gleichzeitig wurden Rechnungen der zweiphasigen Strömung durchgeführt und mit den Meßwerten verglichen. Mit Ausnahme der Silomitte – dort sind insbesondere im Eintrittsbereich die Teilchenkonzentrationen so hoch, daß die Voraussetzungen für die Lagrangesche Betrachtung lokal verletzt werden – zeigen die Ergebnisse für Axialgeschwindigkeit, turbulente kinetische Schwankungsenergie und für die Teilchenkonzentration gute Übereinstimmung mit den Messungen.

Das Spektrum der unterschiedlichen Teilchengrößen (9 bis $62\text{ }\mu\text{m}$) wurde in neun Klassen unterteilt. Die größten und die kleinsten Teilchen fallen nach einigen wenigen Umläufen auf den Boden des Silos bzw. verlassen ihn durch die obenliegenden Öffnungen. Teilchen mit mittlerem Durchmesser neigen zu langen Verweilzeiten, die mehrere Minuten betragen können. Der numerische Aufwand und die Rechenzeiten für entsprechende Simulationen steigen damit sehr stark an und motivieren den Einsatz paralleler Lagrangescher Verfahren.

5.2 Paralleles Lagrangesches Rechenverfahren

Zur Verminderung der hohen Rechenzeiten, die bei großtechnischen Maßstäben bei der Verwendung Lagrangescher Rechenverfahren auftreten, werden parallele Algorithmen auf Basis der Gebietszerlegung eingesetzt. Dynamische Verteilungskonzepte sorgen dafür, daß die Rechenleistung auch dann gleichmäßig auf die verfügbaren Prozessoren aufgeteilt wird, wenn die Partikel inhomogen im Strömungsgebiet verteilt sind.

Das gewählte Parallelkonzept verfolgt ein Hybridschema aus zwei verschiedenen Ansätzen:

- Jeder Prozessor verfolgt genau die seinem Gebiet zugeordneten Abschnitte der Teilchenbahnen.
- Jeder Prozessor berechnet die Bahn eines Teilchens im gesamten Lösungsgebiet

Der erste Ansatz ist einfach, führt aber zwangsläufig auf ungleiche Auslastung der Prozessoren, sobald es zur Teilchenanhäufung in einzelnen Gebieten kommt.

Der zweite Ansatz verspricht eine sehr gute Lastverteilung, es benötigt aber jeder Prozessor die Geometrie- und Strömungsdaten des gesamten Lösungsgebiets, was die maximal mögliche Problemgröße entscheidend einschränkt.

Das Hybridschema vereint den Vorteil hoher Datenlokalität und ausgewogener Lastverteilung beider Ansätze, indem jedem Prozessor primär ein Teilgebiet zur Berechnung zugewiesen wird, er aber im Falle hoher Lastunausgewogenheit Rechenarbeit in sekundären Gebieten übernimmt, wobei der Kommunikationsaufwand begrenzt bleibt.

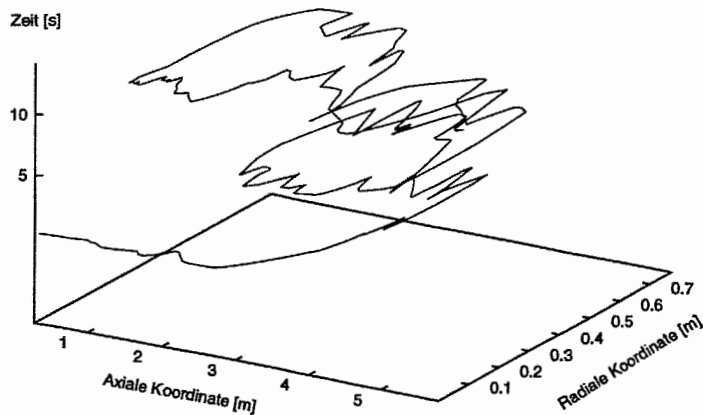
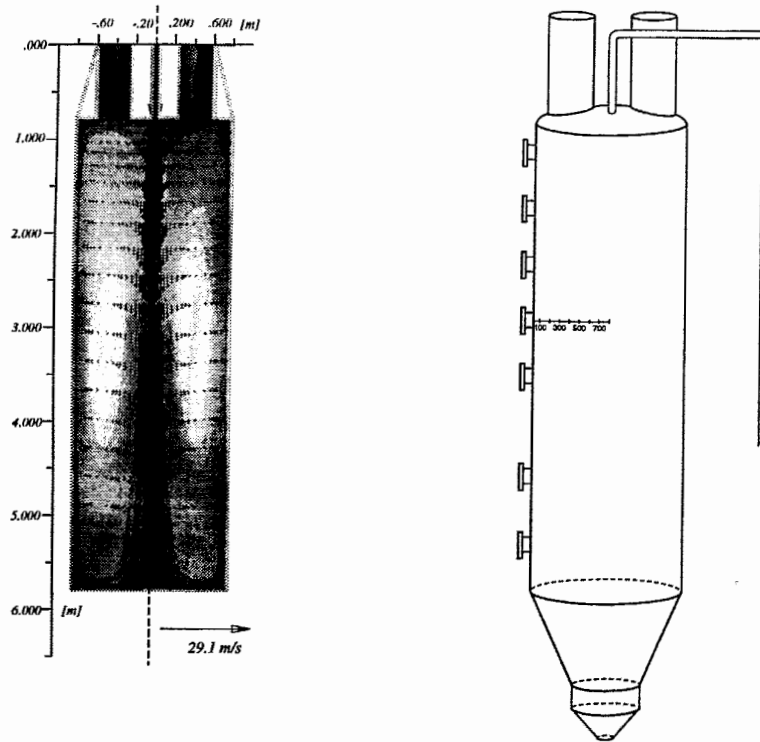


Bild 5: Ausbreitung von Mehlstaub in einem Lagertank

Mit dem Verfahren können zur Zeit zweiphasige Berechnungen mit mehreren hunderttausend Kontrollvolumen auf vernetzten Arbeitsplatzrechnern (Workstations oder PC) durchgeführt werden (Bild 6).

Die hier gezeigten Ergebnisse entstammen zum Teil dem Verbundprojekt BETES (Förderkennzeichen 01 IR 51 A, DLR, Projektträger Informationstechnik des BMBF) sowie dem Sonderforschungsbereich 222 „Heterogene Systeme bei hohen Drücken“. Der Dank der Autoren gilt Herrn Dr.-Ing. Andreas Irmer, Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Numerische Berechnungsverfahren im Maschinenbau, für seine Unterstützung bei der Erstellung und Aufbereitung der Rechenergebnisse.

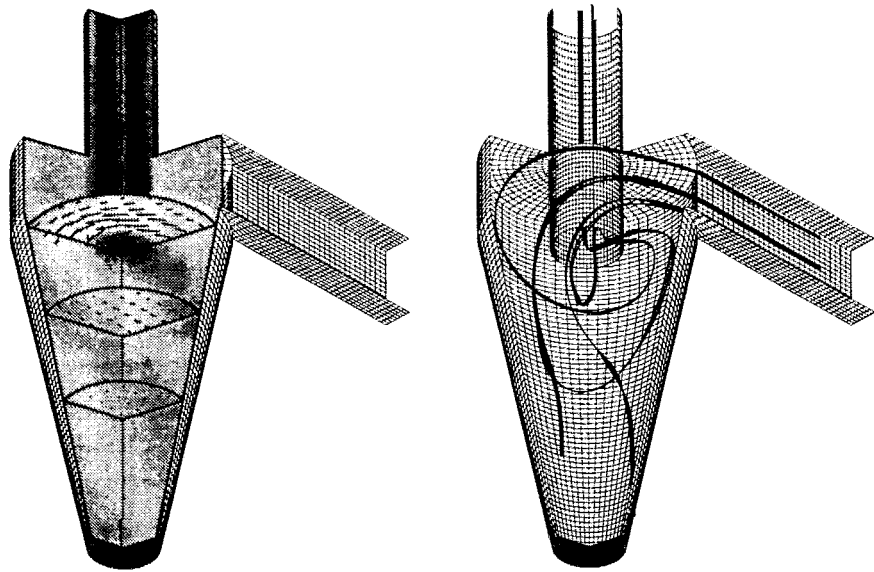


Bild 6: Staubabscheidung in einem Zyklon

Literatur

- [1] R. Bel Fdhila. *Analyse expérimentale et modélisation d'un écoulement vertical à bulles dans un élargissement brusque*. PhD thesis, Institut Polytechnique de Toulouse, Apr 1991.
- [2] H. Fogt and W. Häfner. Application of two-phase modeling to the time dependent flow in a gas-stirred vessel. In C.T Crowe, R. Johnson, A. Prosperetti, M. Sommerfeld, and Y. Tsuji, editors, *Proceedings of the Fluids Engineering Division*, volume 1, pages 143 – 151. ASME, 1996. FED-Vol. 236.
- [3] H. Fogt, M. Perić, A. Kneer, and V. Seidl. Entwicklung eines parallelen Berechnungsverfahrens für teilchenbeladene Stömungen mit Verbrennung. In G. Wolf and R. Krahl, editors, *Statusagung HPSC-97*. DLR-PT-IT, 1997.
- [4] F. Hauert, H. Fogt, A. Vogl, D. Wennerberg, and S. Radandt. Staubverteilung und Geschwindigkeitsparameter in einem pneumatisch befüllten Silo mit numerischen Simulationen. In *Sichere Handhabung brennbarer Stäube*, number 1272 in Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, pages 309 – 326, Düsseldorf, 1996. VDI-Bericht.
- [5] M. Ishii. *Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow*. Eyrolles, Paris, 1975.
- [6] M. Sommerfeld and D. Wennerberg, editors. *5th Workshop on Two Phase Flow Predictions*. Forschungszentrum Jülich GmbH, Mar 19–22 1990. Bilateral Seminars of the International Bureau, Volume 4.