

**Untersuchung zum Mischereinfluß
auf die lokale Struktur
einer adiabaten Zweiphasenströmung
mit einem faseroptischen Sensor**

von der Fakultät Energietechnik der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Klaus Spindler
aus Heilbronn

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter: Prof. Dr. techn. R. Doležal
Tag der mündlichen Prüfung: 27. 2. 1989

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
der Universität Stuttgart

KURZFASSUNG

SPINDLER, KLAUS:

**Untersuchung zum Mischereinfluß auf die lokale Struktur einer adiabaten
Zweiphasenströmung mit einem faseroptischen Sensor**

Eine Zweiphasenströmung aus Flüssigkeit und Gas ist durch eine örtlich und zeitlich veränderliche Phasengrenze gekennzeichnet. Die komplizierten Vorgänge, bedingt durch die Wechselwirkung zwischen den Phasen, erschweren die analytische Behandlung. Zur genauen Beschreibung des Impuls-, Wärme- und Stoffaustausches ist die Kenntnis der Strömungsform sowie der Phasenverteilung erforderlich. Übergänge in den Strömungsformen (z.B. Blasen-/Pfropfenströmung) sind durch eine charakteristische Änderung in den Phasenverteilungen gekennzeichnet.

Zur Messung des örtlichen Gasgehaltes und der Blasenfrequenz in einer Zweiphasenströmung aus Wasser und Luft in einem senkrechten Rohr wurden faseroptische Sensoren und zugehörige Auswertelektronik entwickelt. Verschiedene Verfahren und Materialien zur Herstellung der Sensoren wurden erprobt auch hinsichtlich eines Einsatzes des Sensors in Kältemittel-Zweiphasenströmungen.

Ausführliche Messungen des örtlichen Gasgehaltes und der Blasenfrequenz wurden im Bereich der Blasenströmung bis zum Umschlag in die Pfropfenströmung bei Leerrohrgeschwindigkeiten des Wassers bis 1,75 m/s und der Luft bis 2,4 m/s durchgeführt. Als Vergleichsbasis wurde der mittlere Gasgehalt mit einer radiometrischen Dichtemeßanlage bestimmt.

Der Einfluß verschiedener Mischrohre auf die Ausbildung der Zweiphasenströmung wurde mit einem porösen Sinterkeramikrohr sowie Mischrohren unterschiedlicher Bohrungsanzahl und eingebauten Kapillarrohren untersucht.

Es zeigt sich, daß die radialen Verteilungen von Gasgehalt, Blasenfrequenz und äquivalentem Blasendurchmesser von der Art des Mischrohres stark beeinflusst werden, ebenso der Übergang Blasen-/Pfropfenströmung. Bei großen Leerrohrgeschwindigkeiten des Wassers und geringen Gasgehalten findet man eine Gasgehaltsverteilung mit einem Maximum in Rohrwandnähe (Wandblasenströmung), während bei kleineren Leerrohrgeschwindigkeiten des Wassers und größeren Gasgehalten ein Maximum im Strömungskern auftritt (Kernblasenströmung).

Die Signale des faseroptischen Meßsystems wurden mit einem kommerziellen FFT-Analysator statistisch ausgewertet, um zu einem objektiven Strömungsformindikator zu gelangen. Bei der Blasenströmung weist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Gasgehaltes ein Maximum bei geringem Gasgehalt und bei der Pfropfenströmung ein weiteres Maximum bei großem Gasgehalt auf. Der Strömungs-

ABSTRACT

SPINDLER, KLAUS:

A study on the local structure of the adiabatic two-phase flow produced by different mixing tubes using a fiber optical probe.

Gas-liquid two-phase flows are characterized by local and temporal changing phases. Complicated effects caused by the interaction of the two phases make the analytical description difficult. Describing the momentum, heat and mass transfer it is necessary to know the flow regime and the phase distribution. Transitions in flow regimes (e.g. bubble/slug flow) can be identified by the changing phase distributions.

Fiber optical probes and the corresponding electronic equipment have been developed to measure the local void fraction and bubble frequency in an air-water two-phase flow in a vertical tube. Different methods and materials have been tested producing optical probes especially for the operation in refrigerant two-phase flows later.

Detailed measurements of the local void fraction and the bubble frequency have been carried out in the bubble flow region up to the transition to slug flow. The maximum superficial velocity was 1.75 m/s for water and 2.4 m/s for air. A Gamma densitometer was used to measure the global void fraction and to take in comparison to the integrated void fraction profile.

The effect of different mixing tubes on the development of the two-phase flow type was studied. For that purpose a porous ceramic tube and brass tubes with different number of injection holes and capillary tubes inside have been mounted in a mixing chamber.

It is found that the radial distributions of void fraction, bubble frequency and equivalent bubble diameter are strongly affected by the type of mixing tube just as the transition from bubble to slug flow. The distribution of the void fraction shows a maximum near the tube wall (sliding bubble flow) in case of higher superficial water velocities and lower void fractions. Whereas a maximum in the tube center appears in case of lower superficial water velocities and higher void fractions.

A commercially available FFT-analyzer was used to analyze the statistical contents of the local void fraction measured by the optical system. The probability density function shows a single peaked distribution in the bubble flow region and a double peaked distribution in the slug flow region. Yielding an objective flow regime indicator the higher moments of the distribution functions have been

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
KURZFASSUNG	5
INHALTSVERZEICHNIS	7
FORMELZEICHEN	9
0 EINLEITUNG	11
1 GRUNDLAGEN UND DEFINITIONEN	12
2 FASEROPTISCHER SENSOR ZUR MESSUNG DES LOKALEN GASGEHALTES	16
2.1 Funktionsprinzip	16
2.2 Literaturübersicht faseroptische Sensoren	20
2.3 Anforderungsprofil an den faseroptischen Sensor	28
2.4 Aufbau und Herstellungsverfahren	28
2.4.1 Auswahl des Lichtwellenleiters	28
2.4.2 Faseroptischer Sensor Typ 1	31
2.4.3 Faseroptischer Sensor Typ 2	33
2.4.4 Faseroptischer Sensor Typ 3	35
2.4.5 Einbaufertige faseroptische Sensoren	39
2.5 Meßkette der Faseroptik	40
2.5.1 optoelektronische Bauelemente	41
2.5.2 Signalverarbeitung	43
2.5.2.1 Elektrische Mittelwertbildung	45
2.5.2.2 Digitale Signalverarbeitung	46
2.6 Beeinflussung der Strömung	48
2.6.1 Stromlinien um einen faseroptischen Sensor	48
2.6.2 Benetzungsverhalten der verschiedenen Sensortypen	50
2.6.3 Flüssigkeitsfilmdicke	54
2.6.4 Interaktionen zwischen Sensor und Blasen	56
2.7 Vorteile - Nachteile - Anwendungsgebiete	57
3 RADIOMETRISCHE GASGEHALTSMESSUNG	58
3.1 Literaturübersicht	58
3.2 Physikalische Grundlagen der radiometrischen Gasgehaltsmessung	59
3.3 Dichtemeßstrecke und zugehörige Meßkette	61

	Seite
4 VERSUCHSANLAGE	63
4.1 Mischkammer und Begasungsrohre	65
4.2 Verschiebevorrichtung für faseroptischen Sensor	67
5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	68
6 ERGEBNISSE	69
6.1 Auswertgleichungen zum örtlichen Blasendurchmesser	69
6.2 Radiale Verteilungen des Gasgehaltes, der Blasenfrequenz und des Blasendurchmessers	74
6.3 Einflußgrößen für den Blasendurchmesser	85
6.3.1 Leerrohrgeschwindigkeit der Flüssigkeit	85
6.3.2 Leerrohrgeschwindigkeit des Gases	86
6.3.3 Vergleich verschiedener Begasungsrohre	89
6.4 Übergang Blasenströmung-Pfropfenströmung	94
6.4.1 Literaturübersicht	94
6.4.2 Einfluß der Begasungsrohre	95
6.5 Drift-Flux-Modell	98
6.6 Blasenauftiegs geschwindigkeit	99
7 OBJEKTIVER STRÖMUNGSFORMINDIKATOR	102
7.1 Literaturübersicht	103
7.2 Statistische Analyse des Gasgehaltes	105
7.2.1 Frequenzspektrum	106
7.2.2 Autokorrelation	108
7.2.3 Kreuzkorrelation	110
7.2.4 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	114
7.2.5 Statistische Momente und deren Bedeutung	118
7.2.6 Summenhäufigkeit	122
8 FOTOGRAFIE N DER STRÖMUNGSFORMEN	124
9 FEHLERBETRACHTUNG	127
10 ZUSAMMENFASSUNG	134
11 LITERATUR	138