

GESCHWINDIGKEITS- UND DURCHFLUSSMESSUNG MIT GITTERSENSOREN

H.-M. Prasser

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

1. Gittersensor

Von den schnellen Gittersensoren zur Messung der Gasgehaltsverteilung in einer Zwei-phasenströmung wurde bereits auf den zwei zurückliegenden Workshops berichtet. Eine detaillierte Darstellung der Funktionsweise war 1997 Gegenstand des Beitrags [1]. In darauf folgenden Jahr wurde beschrieben, wie der Sensor zur Visualisierung der Strömungsform in vertikalen Rohrleitungen genutzt werden kann. Weiterhin wurde eine Methode zur Ermittlung von Blasengrößenverteilungen vorgestellt [2]. Im vorliegenden Beitrag wird gezeigt, daß durch Berechnung von Kreuzkorrelationsfunktionen aus den Signalen von zwei hintereinander angeordneten Gittersensoren eine Messung von Geschwindigkeitsprofilen der Gasphase vorgenommen werden kann.

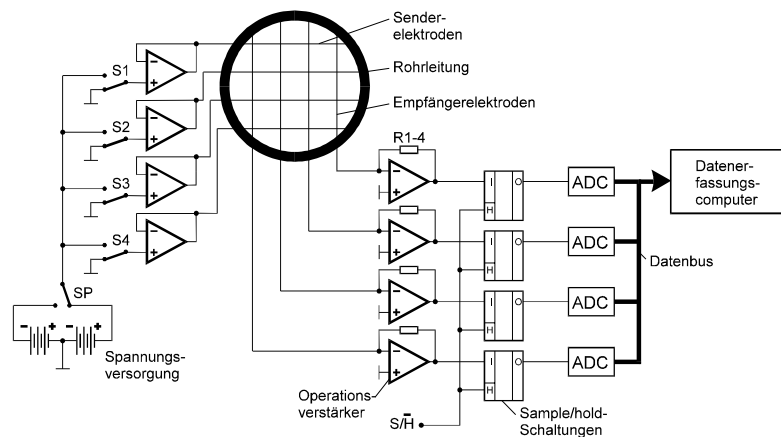


Bild 1 Schema von Gittersensor mit Elektronikeinheit

Ein Gittersensor wird aus zwei Ebenen von Elektroden gebildet, die in Strömungsrichtung hintereinander angeordnet sind. Die Elektroden der ersten Ebene (Senderebene) werden durch eine Multiplexerschaltung zeitlich hintereinander mit kurzen Spannungsimpulsen versorgt (Bild 1). 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. Die Ströme werden nach AD-Wandlung von einem Datenerfassungs-PC für jede Empfänger- und Senderelektrode individuell gespeichert. Nach Aktivierung der letzten Senderelektrode, liegt eine zweidimensionale Matrix von Spannungswerten vor, die die Leitfähigkeiten an allen Kreuzungspunkten der Elektroden von Sender- und Empfängerebene widerspiegelt. Zur Bestimmung der Gasgehaltsverteilung werden diese Werte mit den Kalibrierwerten in Beziehung gesetzt, die bei vollständig mit Flüssigkeit gefüllter Rohrleitung aufgenommen werden. Eine detaillierte Beschreibung ist in [3] enthalten.

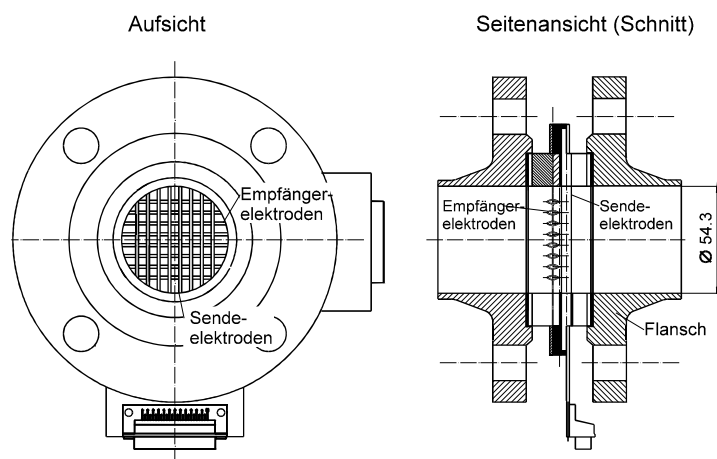


Bild 2 Gittersensor mit 2 x 8 Elektroden

Die Signalerfassungseinheit kann einen Sensor mit zwei Ebenen zu 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 Meßfrequenz kann bis zu 1200 Messungen pro Sekunde betragen. Damit wird eine schnelle Visualisierung der Gasgehaltsverteilung realisiert. Für die hier vorgestellten Experimente wurden zwei Gittersensoren der Nennweite DN50 mit 2 x 8 Elektroden verwendet (Bild 2). Diese Sensoren sind für den Einsatz bei höheren mechanischen Belastungen gedacht, deshalb sind sie mit stäbchenförmigen Elektroden aus nichtrostendem Stahl ausgestattet. Die Stäbchen besitzen einen linsenförmigen Querschnitt, um den hydraulischen Widerstand des Sensors und damit die Strömungsbeeinflussung klein zu halten.

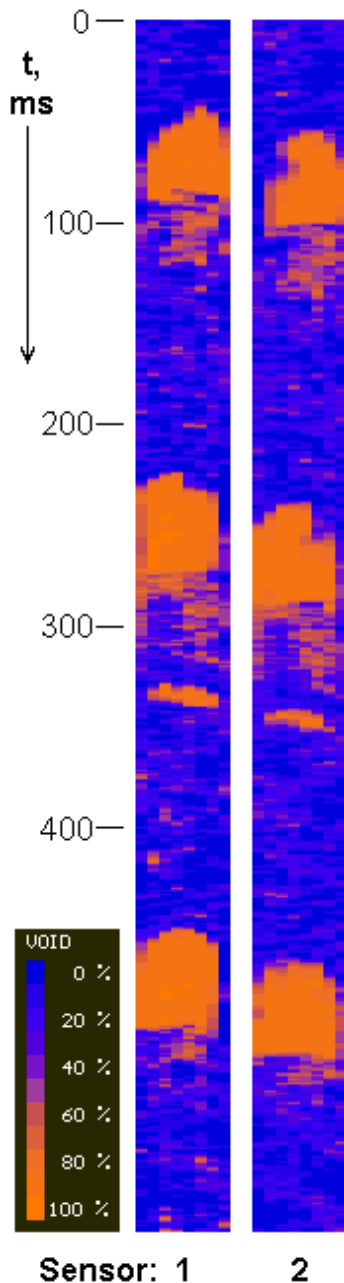
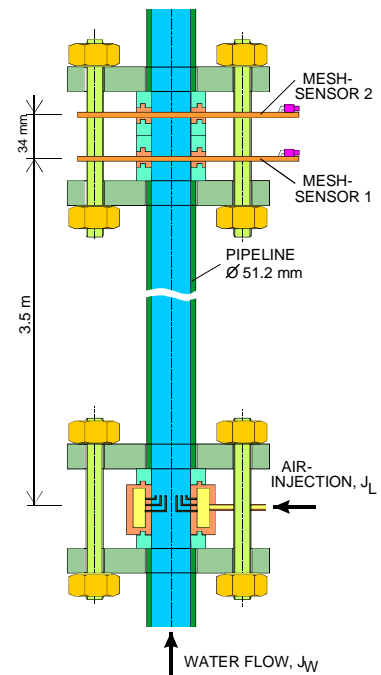


Bild 4 EULERSche Schnittbilder einer Pfropfenströmung ($J_W = 1$ m/s, $J_L = 0,75$ m/s)



2. Versuchsanlage

Bild 3 Vertikale Teststrecke

Es wurde die Strömung eines Luft-Wasser-Gemischs in einer senkrechten Rohrleitung (DN 50) bei Atmosphärendruck und einer Temperatur von 30 °C untersucht (Bild 3). Die Lufteinspeisung erfolgte im unteren Teil der Teststrecke durch gleichmäßig über dem Querschnitt verteilte Kanülen. Hinter einer Einlaufstrecke von ca. 70 L/D waren zwei Gittersensoren angeordnet. Der Abstand zwischen den Meßebenen der zwei Sensoren betrug 34 mm. Die Volumenstromdichten wurden in weiten Bereichen variiert (Wasser: 0 - 4 m/s, Luft: 0 - 12 m/s) und im stationären Zustand wurden Signalsequenzen über jeweils 10 s aufgenommen.

3. Gasgehalts- und Geschwindigkeitsprofile

In Bild 4 ist ein Beispiel für EULERSche Schnittbilder gezeigt, die aus den Signalen der beiden Sensoren aus Bild 3 für eine Pfropfenströmung erhalten wurden. Die Schnittbilder werden konstruiert, indem aus dem Meßsignal eine Serie von momentanen Gasgehaltsverteilungen entlang einer zentral durch die Meße Ebene gelegten Sehne extrahiert wird. Die einzelnen Gasgehaltswerte werden entsprechend einer Farbskala dargestellt und die entstehenden Bildzeilen in ihrer zeitlichen Abfolge von oben nach unten geplottet. In den so gebildeten Darstellungen sind einzelne Blasen und große Pfropfen gut zu erkennen. Es ist deutlich zu sehen, daß beide Sensoren eine ähnliche Strömungsstruktur detektieren. Es besteht jedoch eine klar erkennbare Laufzeitdifferenz, die auf die axiale Distanz zwischen den Sensoren und die Bewegungsgeschwindigkeit der Gasphase zurückzuführen ist. Diese Tatsache legt es nahe, daß es möglich sein sollte, die Geschwindigkeit der Gasphase mit Hilfe der Kreuzkorrelation zu bestimmen.

Bild 5 zeigt zur Illustration Zeitverläufe von lokalen Gasanteilen, die an identischen, d.h. genau übereinander liegenden Kreuzungspunkten zweier Elektroden von den beiden Sensoren gemessen wurden, und zwar für einen Meßpunkt im Zentrum und einen weiteren am Rand des Rohrquerschnitts. Besonders im Zentrum, aber auch am Rand ist die charakteristische Zeitverschiebung der Signale zu erkennen.

In Bild 6 sind Beispiele für Kreuzkorrelationsfunktionen dargestellt, die für eine Blasen- und eine Pfropfenströmung aus den Meßsignalen berechnet wurden. Die Funktionen weisen klare Maxima auf, deren Lage mit der mittleren Geschwindigkeit der Gasphase korrespondiert. Die Geschwindigkeit ergibt sich aus der Zeitverschiebung, bei der das Maximum liegt (δt_{max}) und der Basislänge, d.h. dem axialen Abstand zwischen den Meßebenen beider Sensoren Δz wie folgt: $w_L = \Delta z / \delta t_{max}$. Das weniger scharfe Maximum bei der Pfropfenströmung ist auf die größeren Geschwindigkeitsfluktuationen zurückzuführen, die bei dieser Strömungsform im Vergleich zur Blasenströmung auftreten. Deutlich zu erkennen ist bei beiden Beispielen der Unterschied in der Zeitverschiebung zwischen Rand und Zentrum der Rohrleitung, der offensichtlich durch das radiale Geschwindigkeitsprofil verursacht wird.

Wenn für alle zur Verfügung stehenden Kreuzungspunkte Kreuzkorrelationsfunktionen berechnet und deren Maxima ermittelt werden, dann erhält man die Geschwindigkeitsverteilung der Gasphase im Meßquerschnitt. Die einzelnen, auf diese Weise erhaltenen Geschwindigkeiten sind für die in Bild 4 gezeigte Strömung in Abhängigkeit von Radius des jeweiligen Meßpunkts dargestellt. Zusätzlich ist das radiale Gasgehaltsprofil eingetragen, das durch zeitliche Mittelung der vom Gittersensor gemessenen momentanen Gasgehaltsverteilungen ermittelt wurde. Bei dem gewählten Beispiel (Pfropfenströmung) liegt ein ausgeprägtes Gasgehaltsmaximum im Zentrum vor. Die Gasgeschwindigkeit hat ebenfalls ihr Maximum im Zentrum, wobei das Profil jedoch wesentlich ausgeglichener ist. Das liegt zum einen an dem ohnehin relativ ausgeglichenen Profil der Flüssigkeitgeschwindigkeit in einer turbulenten Rohrströmung und zum anderen darin, daß hierzu die Relativgeschwindigkeit der Gasphase addiert wird, die ebenfalls nur wenig vom Radius abhängt.

Bild 8 zeigt weitere Ergebnisse für verschiedene Leerrohrgeschwindigkeiten. Bei zunehmender Gasgeschwindigkeit wächst aufgrund der begrenzten Zeitauflösung des Sensors der Diskretisierungsfehler an. Zur Illustration sind einige Fehlerintervalle in Bild 8 eingetragen. Der Diskretisierungs-

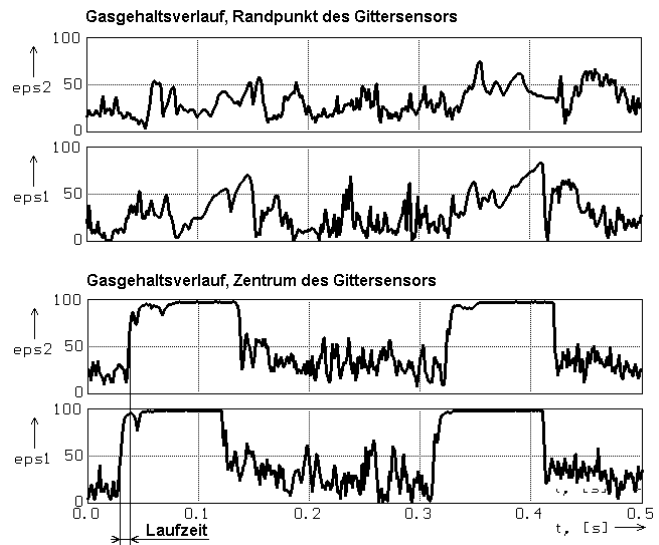


Bild 5 Zeitverläufe von lokalen Gasanteilen an einzelnen Meßpunkten der Gittersensoren bei einer Pfropfenströmung

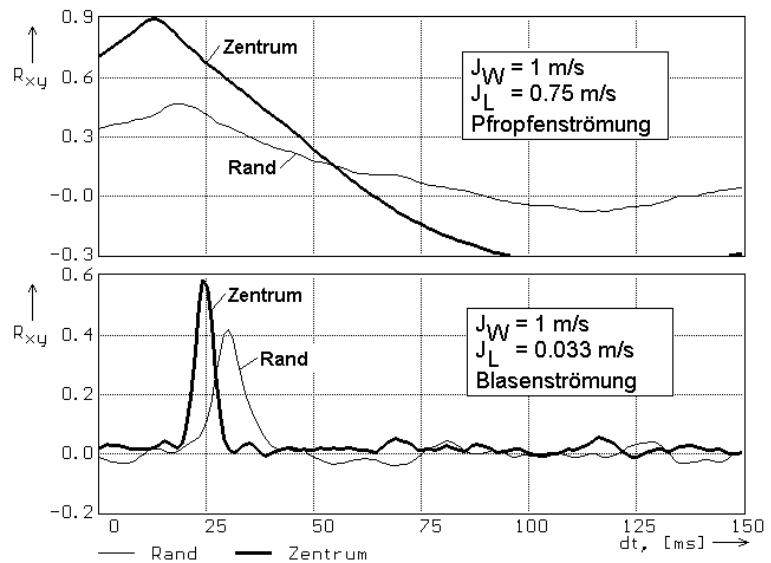


Bild 6 Kreuzkorrelationsfunktionen aus Gasgehaltssignalen identischer Meßpunkte beider Sensoren

rungsfehler beträgt $\pm 1.7\%$ bei einer Geschwindigkeit von 1 m/s. Er wächst mit zunehmender Geschwindigkeit an und erreicht $\pm 17\%$ bei 10 m/s.

4. Messung der Volumenstromdichte der Luft

Durch Integration des Produkts aus lokalem Gasanteil und Gasgeschwindigkeit über dem Strömungsquerschnitt kann die Volumenstromdichte der Gasphase ermittelt werden (Gl. (1)). Dadurch ergibt sich die Möglichkeit einer Überprüfung der Geschwindigkeitsmessung nach dem Kreuzkorrelationsverfahren, denn die so zu ermittelnden Gasvolumenstromdichten müssen mit den Vorgabewerten der einzelnen Experimente übereinstimmen, die durch Messung des einphasigen Gasvolumenstroms vor der Einspeisestelle erhalten werden.

$$J_{L,m} = \sum_{i,j} a_{i,j} \cdot w_{L,i,j} \cdot \epsilon_{i,j} \quad (1)$$

In Gl. (1) sind $a_{i,j}$ die der jeweiligen Meßposition im Gitter zuzuordnenden Flächenanteile (Wichtungskoeffizienten der Querschnittsmittelung). Das Ergebnis des Vergleichs ist in Bild 9 dargestellt. Dabei wurde der Wasservolumenstrom unabhängig vom Luftdurchsatz variiert. Im Bild 9 ist zusätzlich angegeben, welche Strömungsform bei den einzelnen Meßpunkten vorgelegen hat. Die Strömungsform wurde mit Hilfe der Visualisierung durch den Gittersensor bestimmt. Eine akzeptable Übereinstimmung zwischen Vorgabe und Meßwert wurde bei der Blasenströmung bei kleinen Geschwindigkeiten sowie bei der Pfropfen- und der Schaumströmung vorgefunden. Bei der Ringströmung ist eine größere Streuung der Punkte zu beobachten, weil hier im Zentrum der Rohrleitung bereits kaum noch Phasenwechsel registriert werden und die Kreuzkorrelation deshalb ungenau ist.

Eine weitergehende Analyse zeigt, daß bei kleinen Volumenstromdichten der Fehler der Gasgehaltsmessung im Gesamtmeßfehler überwiegt. Wie be-

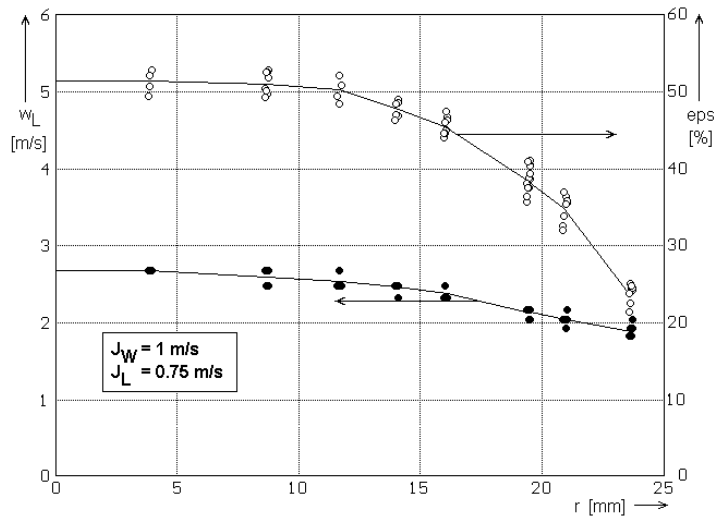


Bild 7 Radiale Verteilungen von Volumenanteil ϵ und Geschwindigkeit w_L der Luft

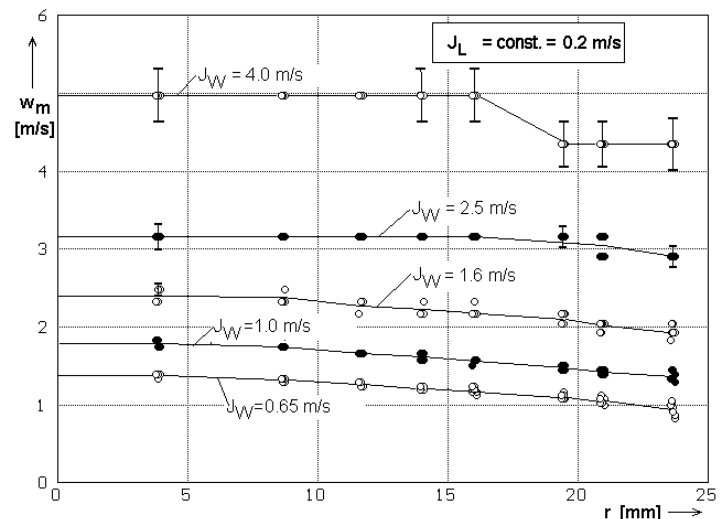


Bild 8 Profile der Luftgeschwindigkeit bei Variation der Volumenstromdichte des Wassers

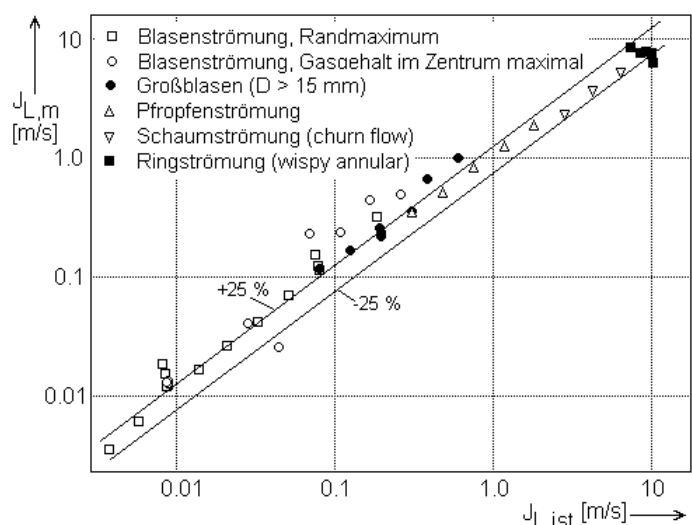


Bild 9 Vergleich von vorgegebener Luft-Volumen $J_{L,ist}$ mit dem Meßwert $J_{L,m}$ nach Gl. (1)

reits in [2] festgestellt wurde, weisen die mittleren Gasgehalte, die durch den Gittersensor zu erhalten sind, im Vergleich zu einem Gamma-Densitometer absolute Abweichungen von bis zu $\pm 0,05$ auf. Dieser absolute Fehler ist im gesamten Bereich von 0 - 100 % Gasanteil etwa konstant. Bei Anwendung von Gl. (1) ist jedoch der relative Fehler des Gasgehaltsprofils relevant. Wenn man davon ausgeht, daß der Fehler der gemessenen Volumenstromdichte $J_{L,m}$ hauptsächlich durch den Diskretisierungsfehler der Gasgeschwindigkeit und den absoluten Fehler des Gasgehalts bestimmt wird, dann erhält man die in Bild 10 dargestellten Fehlerintervalle.

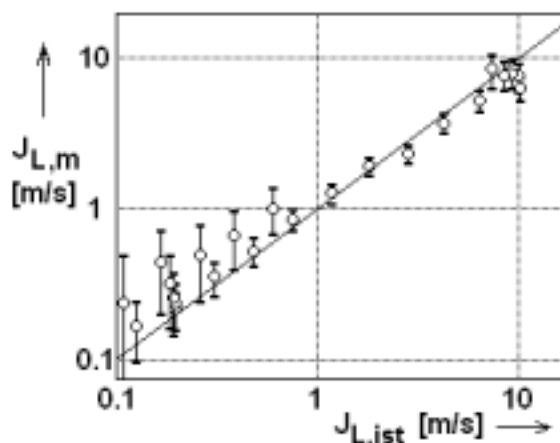


Bild 10 Vergleich zwischen eingespeister und gemessener Volumenstromdichte mit Fehlerintervallen

In Bild 10 wurden gegenüber Bild 9 nur Meßpunkte aus dem Bereich $0.1 \leq J_w \leq 4$ m/s und $0.1 \leq J_L \leq 10$ m/s aufgenommen. Dies ist das Gebiet der Volumenstromdichten, innerhalb dessen die Fehlerintervalle der gemessenen Gasvolumenstromdichte noch eine vertretbare Größe aufweisen und den Vorgabewert einschließen. Es kann folglich davon ausgegangen werden, daß die vorgestellte Methode der Kreuzkorrelation zur Geschwindigkeitsmessung der Gasphase hier angewandt werden kann.

5. Zusammenfassung

Es wird eine Kreuzkorrelationsmethode zur Messung der Gasgeschwindigkeit mit Hilfe von zwei hintereinander angeordneten Gittersensoren vorgestellt, mit der sich radiale Geschwindigkeitsprofile ermitteln lassen. Durch Hinzuziehung von Gasgehaltsprofilen, die der Sensor ebenfalls liefert, kann die in die Teststrecke eingespeiste Volumenstromdichte der Gasphase rekonstruiert werden, was die Methode bestätigt. Es ergibt sich eine neue Möglichkeit der Messung von Geschwindigkeitsprofilen. Außerdem steht ein neues Meßverfahren für den Gasvolumenstrom in einer Zweiphasenströmung in Aussicht.

6. Formelzeichen

a	Wichtungskoeffizient	J_L	Volumenstromdichte Luft, m/s
D	Durchmesser, m	J_w	Volumenstromdichte Wasser, m/s
eps, ϵ	volumetrischer Gasanteil, %	m	Index Meßwert
ist	Index Vorgabewert	r	Radius, m
i,j	Indizes	w_L	Phasengeschwindigkeit Wasser

7. Literatur

- [1] H.-M. Prasser: "Leitfähigkeitssensoren für die Bestimmung von Parametern einer Zweiphasenströmung", Workshop "Meßtechnik für stationäre und transiente Mehrphasenströmungen", 06.-07. Nov. 1997 in Rossendorf, Tagungsband FZR-204, Dez. 1997, S. 64-71.
- [2] H.-M. Prasser: "Messung von Blasengrößenverteilungen mit Gittersensoren", Workshop Meßtechnik für stationäre und transiente Mehrphasenströmungen, 24.-25. Sept. 1998, Rossendorf, Bericht FZR-241, S. 157-164.
- [3] H.-M. Prasser, A. Böttger, J. Zschau: "A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows", Flow Measurement and Instrumentation 9 (1998) 111-119.
- [4] H.-M. Prasser: Messung von Gasgehalt, Gasgeschwindigkeit und Volumenstrom mit Gittersensoren, Vortrag auf CVC, 1. Chemnitzer Verfahrenstechnisches Colloquium, 25.-26.11.1998, Universität Chemnitz.