

OPTISCHE MESSUNG DER SCHWALLGESCHWINDIGKEIT EINER ZWEI-PHASEN-STRÖMUNG GAS/FLÜSSIGKEIT IN EINEM HORIZONTALEREN ROHR

D. Petrak¹; Y. Ladam², H. Rauh¹; C. Schwind¹

¹Institut für Mechanik, Technische Universität Chemnitz, 09126 Chemnitz

²SINTEF Petroleum Research, N 7465 Trondheim, Norway

Abstract

Eine horizontale Rohrleitung mit einem inneren Durchmesser von 0,069 m wurde von Zweiphasenströmungen der Struktur Luft/Flüssigkeit durchströmt, wobei als Flüssigkeit Wasser bzw. Öl eingesetzt wurde. Bei bestimmten Leerrohrgeschwindigkeiten von Luft und Wasser/Öl treten sogenannte Schwallströmungen (slug flows) auf, die mit hohen Geschwindigkeiten und Drücken der Schwallregion verbunden sind. Im Beitrag wird ein optisches Ortsfilterverfahren beschrieben, mit dem die Geschwindigkeit lokal im hoch mit Blasen beladenen Schwall bei Luft/Öl- und Luft/Wasser-Strömungen bestimmt wurde. Hauptbestandteil des optischen Ortsfilterverfahrens ist eine Messsonde, die in die Rohrleitung eingeführt wurde. Mit Hilfe einer Laborapparatur wurden Probemessungen an Einzelblasen vorgenommen. Jede Schwallregion besitzt eine hohe Geschwindigkeit an der Schwallfront, die längs der Schwallregion in unterschiedlicher Form abfällt. Bei den Schwallregionen der Luft/Öl-Strömung steigt die Geschwindigkeit zum Ende der Schwallregion wieder an.

Einleitung

In der Fluidodynamik zweiphasig (Gas/Flüssigkeit) durchströmter horizontaler Rohrleitungen treten unterschiedliche Strömungsformen auf: Schichtenströmung, Pfropfenströmung, Schwallströmung, Ringströmung. Die diskontinuierlichen Strömungsformen Pfropfen- und Schwallströmung zeichnen sich durch eine starke zeitliche Änderung des Flüssigkeitsgehalts entlang der Rohrstrecke aus. Ein Schwall ist ein Flüssigkeitspfropfen in dem Blasen dispergiert sind. In der Schwallströmung nehmen die Impulskräfte auf die Auflagen der Rohrleitung, die Pumpen und nachgeschaltete Apparate zu. Die Strömungsform Schwallströmung behindert die Funktionsweise von Gasseparatoren und kann Armaturen und Bauteile schädigen. Es besteht daher ein wissenschaftlich-technisches Interesse an der Messung und Berechnung von Schwallströmungen, um sicher den Übergang von der kontinuierlichen zur pulsierenden Strömung vorherzusagen. Bedeutende technische Anwendungsgebiete sind nach Petritsch 1998 die Kernnergietechnik und nach Oliemans 1994 die Öl/Gas-Produktion.

Folgende Parameter beeinflussen die Bildung einer pulsierenden Strömung in einer Rohrleitung ohne Einbauten: Massenströme, Dichten, Viskositäten, Rohrdurchmesser, Rohrrauigkeit, Rohrneigung. Der Übergang von der kontinuierlichen Schichtenströmung zur Schwallströmung wird mit Hilfe von Stabilitätskriterien berechnet. Es gibt verschiedene Ursachen zur Entstehung der Schwallströmung. Dazu zählen u.a. Blasenkoaleszenz,

Wellenkoaleszenz, Kelvin-Helmholtz-Instabilität, topographische und geometrische Bedingungen.

Zu den üblichen Messgrößen in Schwallströmungen zählen: statischer Druck, Volumenstrom bzw. Leerrohrgeschwindigkeit, Temperatur, Schichthöhe, Schwalllänge, Schwallfrequenz. Phasenanteile können nach Petritsch 1998 mit konduktiver Tomographie erfasst werden. Faseroptische Messsonden mit Einzelwellenleiter werden zur Bestimmung von Blasengrößen in Form von Sehnenlängenverteilungen verwendet, siehe Andreussi et al. 1993. Nach Lewis et al. 2001 lässt sich auch die Heißfilm-Anemometrie für Phasenbestimmungen einschließlich Blasengrößen in Schwallströmungen einsetzen. Das Strömungsfeld der Flüssigkeit um eine einzelne Taylor-Blase in einer vertikalen Rohrleitung lässt sich nach Nogueira et al. 2003 auch mittels simultaner PIV und gepulster Schattenbildtechnik auflösen.

Eine weitere interessierende Messgröße ist die lokale Geschwindigkeit innerhalb der Schwallregion, die mit hoher Zeitauflösung bestimmt wird. Der hohe Blasenanteil im Schwall führt jedoch zur Absorption von Streulicht, sodass bekannte Messverfahren wie die Laser-Doppler- und Phasen-Doppler-Verfahren im Innern der Schwallregion nicht einsetzbar sind. Ziel der Untersuchungen war daher der Einsatz einer bekannten Messsonde nach Petrak 1997 auf Basis der faseroptischen Ortsfiltertechnik, die bisher für lokale Messungen der Geschwindigkeit fester Partikel in Gas- und Flüssigkeitsströmungen verwendet wurde. Für grundsätzliche Untersuchungen an Blasenströmungen wurde eine Testapparatur benutzt, die bewegte Einzelblasen erzeugt. Die Untersuchungen an Schwallströmungen Wasser/Luft und Öl/Luft erfolgten an einer Versuchsanlage im Labor für Mehrphasenströmungen von SINTEF Petroleum Research Trondheim.

Messsystem mit faseroptischer Messsonde

Der prinzipielle Aufbau der faseroptischen Messsonde ist in Abbildung 1 dargestellt. Das aus Edelstahl gefertigte Messsondenrohr hat einen Aussendurchmesser von 8 mm und eine Blasendurchtrittsöffnung von 5 mm axialer Länge. Nahe der Spitze des Meßsondenrohres befindet sich im Abstand von 21 mm die Blasendurchströmöffnung, die das Meßvolumen darstellt. Hier sind, einander gegenüberliegend, das Ortsfrequenzfilter in Form eines faseroptischen Differenzgitters und die Beleuchtungseinrichtung untergebracht.

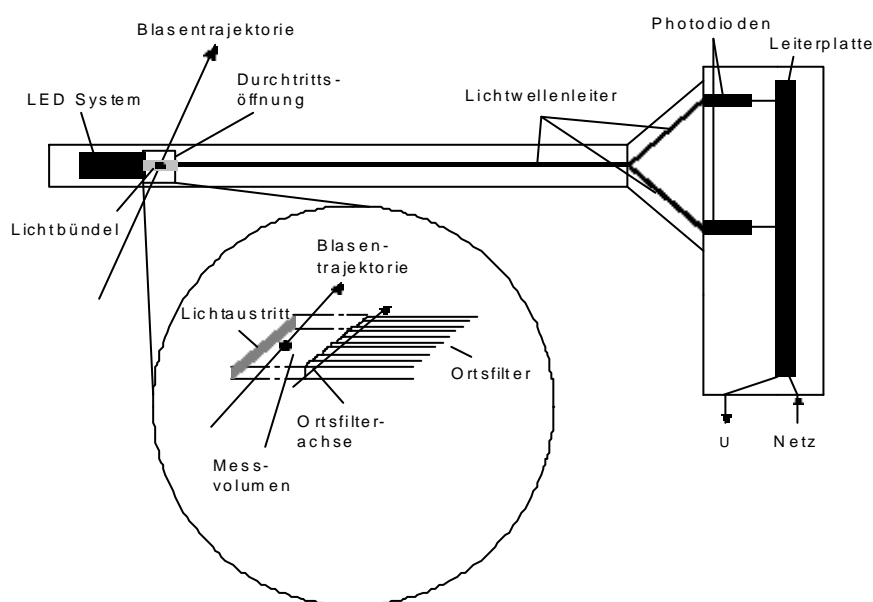


Abb. 1: Schematischer Aufbau der Messsonde

Das faseroptische Differenzgitter ist aus zwei um die halbe Gitterkonstante $g/2$ versetzte Einzelgitter aus je 9 Lichtwellenleitern aufgebaut und wird in einem Wickelverfahren hergestellt. Als Lichtwellenleiter wird ein Stufenindex-Multimode-Typ mit $125\ \mu\text{m}$ Kerndurchmesser und $140\ \mu\text{m}$ Manteldurchmesser verwendet. Das Differenzgitter hat eine Gesamtlänge von $2,52\ \text{mm}$ und eine Gitterkonstante $g = 280\ \mu\text{m}$. Als Lichtquelle wird eine Hochleistungs-LED ($810\ \text{nm}$) mit Gradientenindexoptik eingesetzt, die sich am äußeren Ende des Meßsondenrohres befindet und ein paralleles Lichtbündel ($150\ \mu\text{W}$) erzeugt. Die parallele Beleuchtung der Blase erzeugt ein Bild, das als bewegtes Intensitätsmuster auf das Differenzgitter fällt. Als Photoempfänger werden zwei Si-PIN-Photodioden benutzt, die mit einem Differenzverstärker verbunden sind. Die Signalauswertung auf Basis der FFT-Analyse erfolgt mit einer PC-Meßkarte. Ergebnis der Frequenzanalyse eines transienten Geschwindigkeitssignals ist eine charakteristische Frequenz f_0 , deren Multiplikation mit der Gitterkonstanten g die gesuchte Blasengeschwindigkeit ergibt.

Messung an Einzelblasen

Um das Messsystem zu testen, wurde zunächst eine Laborapparatur aufgebaut. Die Apparatur besteht aus einem vertikalen Kanalstück (B $100\ \text{mm}$, T $100\ \text{mm}$, L $300\ \text{mm}$), dessen Wände aus Piacryl bestehen. In den Boden ist eine Präzisionsglaskapillare eingelassen (Innendurchmesser $150\ \mu\text{m}$ bzw. $500\ \mu\text{m}$), die mit einer Spritzenpumpe vom Typ Perfusor compact S verbunden ist. Die Apparatur ist in Abbildung 2 angegeben.

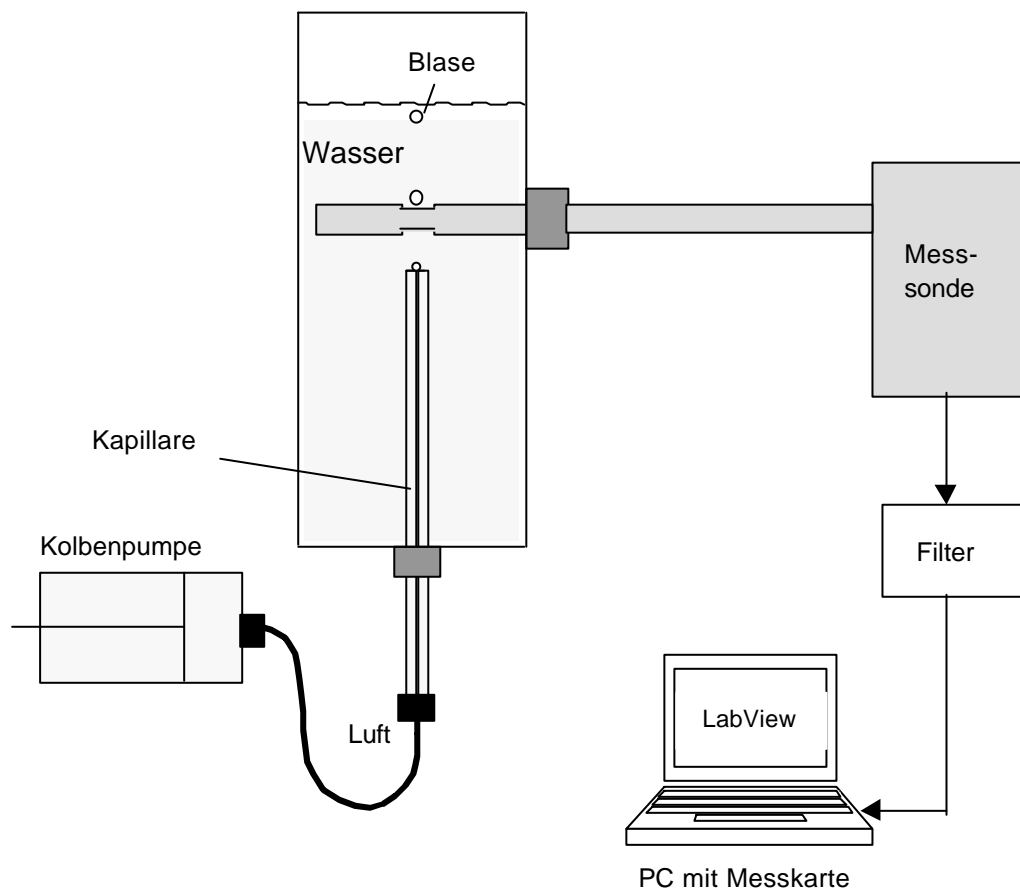


Abb. 2: Schematische Darstellung der Einzelblasen-Laborapparatur

Die Messsonde wird horizontal eingeführt und dicht über dem Blasenaustritt so positioniert, dass die im Wasser aufsteigenden Luftblasen die Durchtrittsöffnung der Messsonde passieren können. Der an der Spritzenpumpe eingestellte Luftvolumenstrom wurde im Bereich $20\ \text{ml/h}$ bis $100\ \text{ml/h}$ variiert. Zusätzlich wurde die Blasenbewegung mit einer Digitalkamera

aufgenommen und aus den benutzten Daten Belichtungszeit und Blasenweg eine mittlere Blasengeschwindigkeit berechnet. Abbildung 3 zeigt das Entstehen und die Trajektorie einer Luftblase.

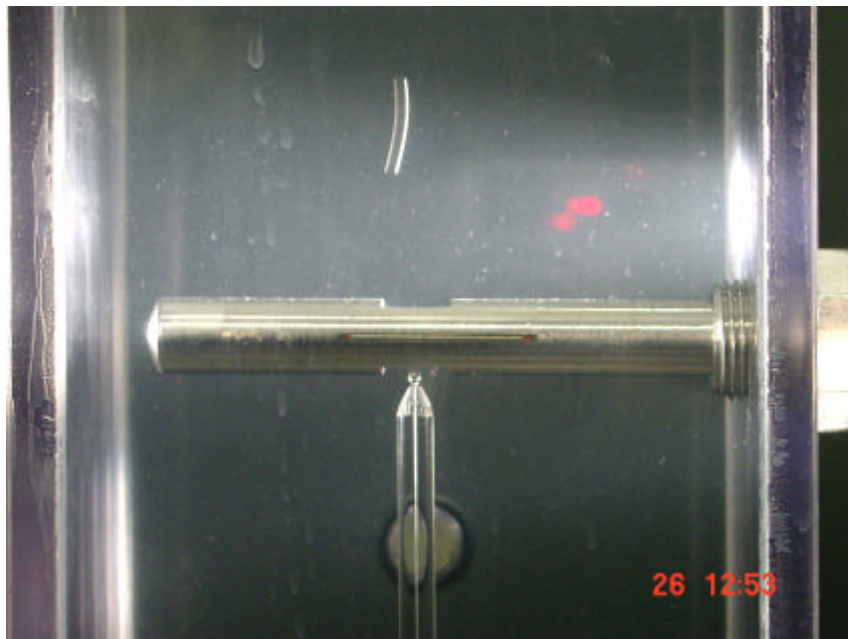


Abb. 3: Bewegung einer Einzelblase (Kapillare 150 μm , Belichtungszeit 1/15 s)

Wenn ein Lichtstrahl auf eine in Wasser befindliche kugelförmige Luftblase trifft, so wird der Lichtstrahl an der gekrümmten Phasengrenzfläche mehrfach reflektiert und gebrochen. Stellt man sich jetzt das parallel beleuchtete Ortsfilter als eine Mehrfachanordnung von Lichtschranken vor, so verursacht das Eintreten der Luftblase eine Verminderung der auf die Eingangsflächen der Lichtwellenleiter fallenden Lichtintensität. Das von einer Blase verursachte Burstsinal wird daher niederfrequent moduliert. Um Fehler bei der Frequenzanalyse zu vermeiden, ist deshalb eine Hochpassfilterung des Messsignals notwendig. In Abbildung 4 sind ein Originalsignal und das zugehörige hochpassgefilterte Signal für eine einzelne Luftblase zu sehen.

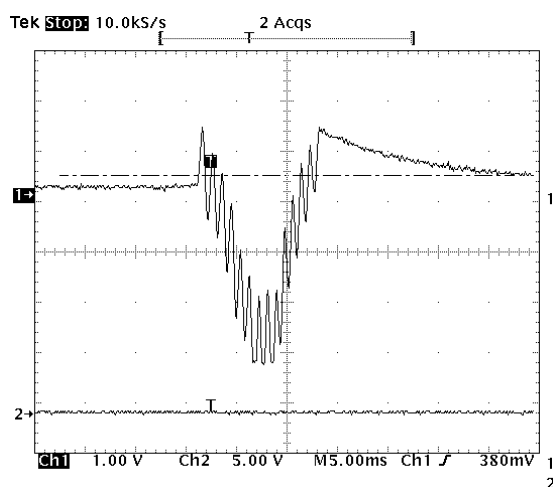


Abb. 4a : Rohsignal einer Luftblase

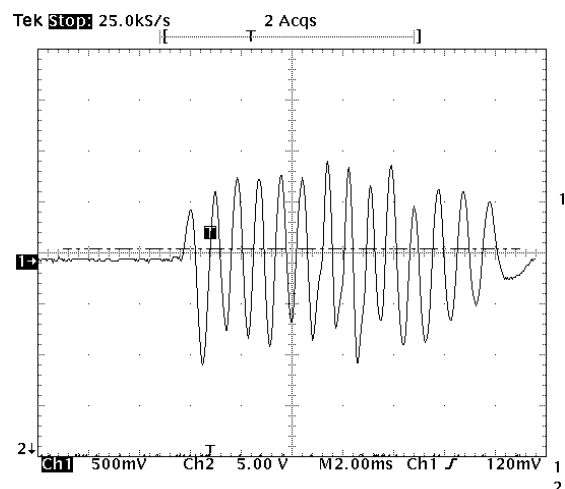


Abb. 4b : hochpassgefiltertes Rohsignal

Messungen an Schwallströmungen SINTEF Versuchsanlage

Die Versuchsanlage im Labor für Mehrphasenströmungen von SINTEF Petroleum Research Trondheim besteht aus einer insgesamt 217 m langen horizontalen Rohrleitungsstrecke. Die Rohrleitung ist aus Stahlrohren mit einem Innendurchmesser von 0,069 m zusammengesetzt. Einige Abschnitte in Form von transparentem PVC-Rohr mit einem Innendurchmesser von 0,0672 m werden für Beobachtungen genutzt.

Die Betriebsweise der Versuchsanlage ist variabel. Als Flüssigkeiten kommen Wasser und Öl (Exssol d80) und als Gas Luft und Schwefelhexafluorid (SF6) zum Einsatz. Der maximale Betriebsdruck beträgt 10 bar. Die Leerrohrgeschwindigkeiten liegen für Flüssigkeit im Bereich von 0,003 m/s bis 2 m/s und für Gas von 0,15 m/s bis 15 m/s.

Für die hier dargestellten Messungen wurde als Flüssigkeit Wasser und Exssol d80 verwendet und als Gas Luft unter Atmosphärendruck. Die Messdaten sind in Tabelle 1 enthalten.

Tabelle 1 : Versuchsdaten der Schwallströmungen

	Dichte in kg/m ³	Zähigkeit in mPa·s	Leerrohrgeschwindigkeit in m/s
Luft	1,2	0,015	0,6 – 4,0
Exssol d80	795	1,75	0,2 – 0,34
Wasser	998	1,01	0,2 – 0,96

Die Messungen wurden in dem 25 m langen transparenten Testabschnitt vorgenommen. Vor dem Testabschnitt befindet sich eine 150 m lange Einlaufstrecke zur Einstellung der Strömungsprofile. Am Ende der Teststrecke befindet sich ein Zyklon, der gewissermaßen die Schwallströmung beendet. Die Versuchsanlage ist in Abbildung 5 dargestellt.

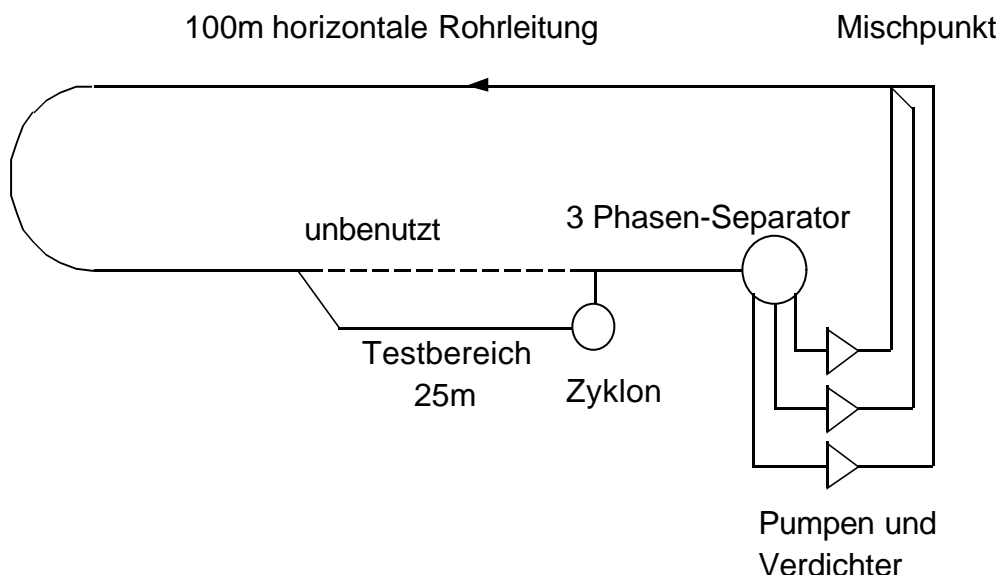


Abb. 5 : Versuchsanlage von SINTEF Petroleum Research Trondheim

Die Leerrohrgeschwindigkeiten $v_{i,Öl}$, $v_{i,Wasser}$ und $v_{i,Luft}$ werden vor dem Mischpunkt in separaten Leitungen bestimmt. Dazu werden der Ölvolumenstrom mit einem Coriolis-Messgerät mit einer Genauigkeit von 0,1 % gemessen, der Wasservolumenstrom mit einem

MID-Messgerät mit einer Genauigkeit von 1 % und der Luftvolumenstrom mit einem Vortex-Messgerät mit einer Genauigkeit von 1%. Zusätzlich werden in dem Testabschnitt der absolute statische Druck und Druckgradienten gemessen. Phasenanteile können mit einem Kleinwinkelgammaadensitometer erfasst werden.

Messung der Schwallgeschwindigkeit

Die Messsonde wurde im Testabschnitt über eine Verschraubung von oben in das PVC-Rohr eingeführt und konnte mit dem Messvolumen in unterschiedlichem Abstand y von der unteren Rohrwand positioniert werden (Abbildung 6).

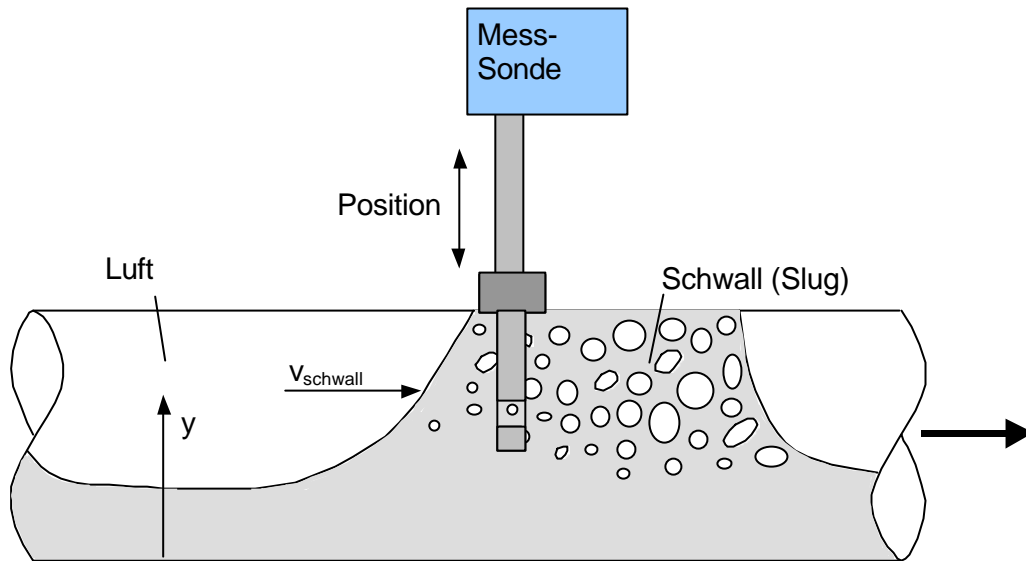


Abb. 6: Schematische Darstellung der Messsondenposition in der Schwallströmung

Exemplarische Messungen sind in den Abbildungen 7 und 8 angegeben. Die Abbildungen zeigen jeweils den Geschwindigkeitsverlauf $v_{\text{Schwall}}(t)$ über einen größeren Zeitraum und dazu einen zeitlichen Auszug für einen einzelnen Schwall. Messort ist einige Millimeter unterhalb der oberen Rohrwand.

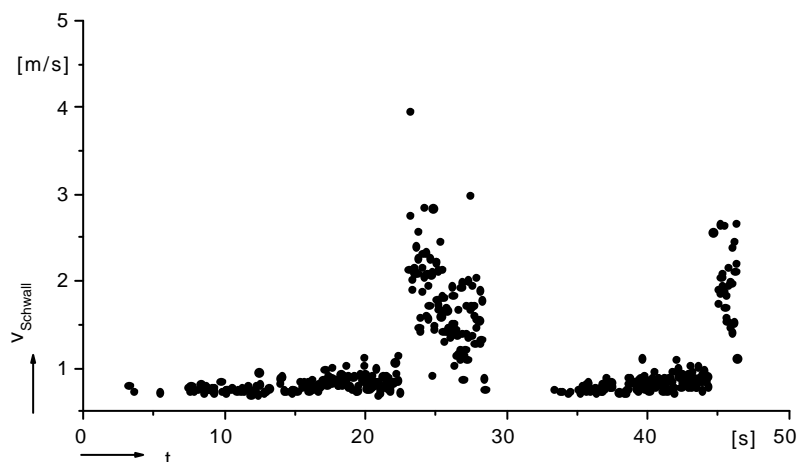


Abb. 7a: Wasser/Luft-Schwallströmung mit langen Schwallregionen

$$v_{1,\text{Wasser}} = 0,25 \text{ m/s}, \quad v_{1,\text{Luft}} = 0,6 \text{ m/s}, \quad y = 63 \text{ mm}$$

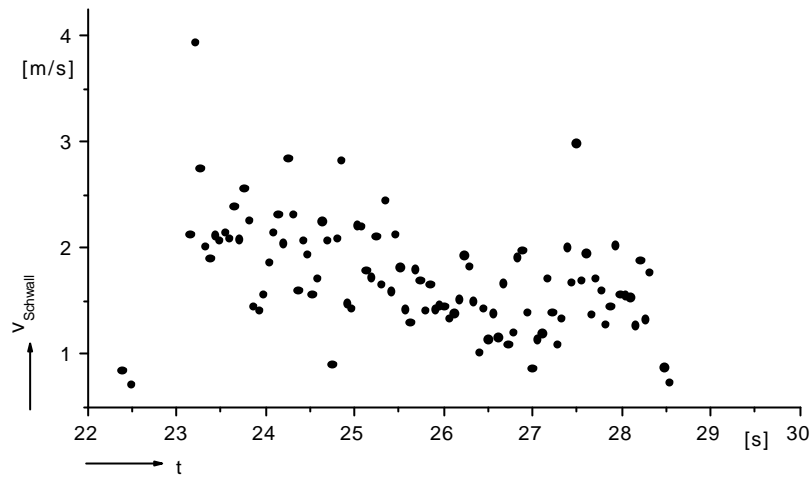


Abb. 7b: Wasser/Luft-Schwallströmung mit langen Schwallregionen, Auszug aus Abb. 7a
 $v_{i,Wasser} = 0,25 \text{ m/s}$, $v_{i,Luft} = 0,6 \text{ m/s}$, $y = 63 \text{ mm}$

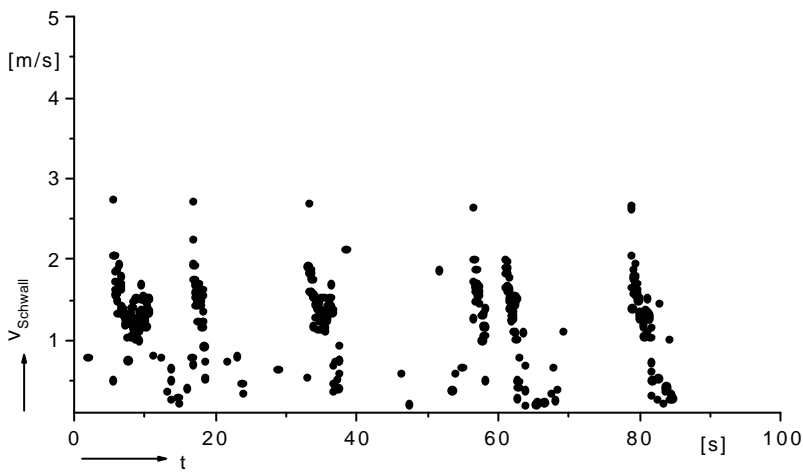


Abb. 8a: Öl/Luft-Schwallströmung mit langen Schwallregionen
 $v_{i,Öl} = 0,20 \text{ m/s}$, $v_{i,Luft} = 0,9 \text{ m/s}$, $y = 54 \text{ mm}$

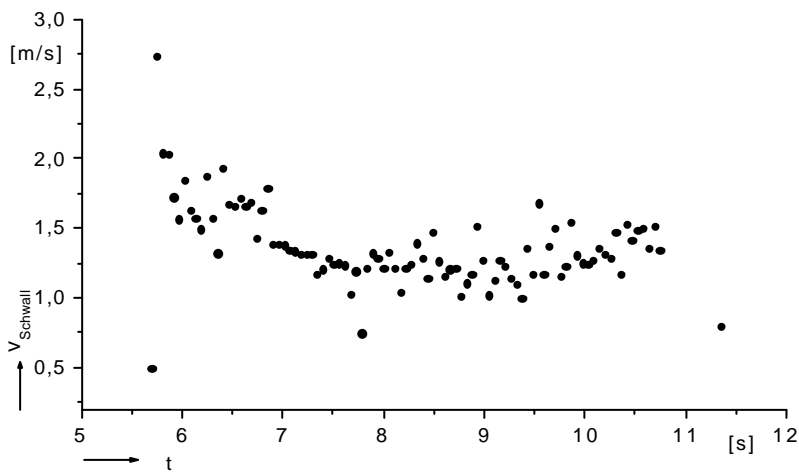


Abb. 8b: Öl/Luft-Schwallströmung mit langen Schwallregionen, Auszug aus Abb. 8a
 $v_{i,Öl} = 0,20 \text{ m/s}$, $v_{i,Luft} = 0,9 \text{ m/s}$, $y = 54 \text{ mm}$

Bei sämtlichen Untersuchungen steigt die Schwallgeschwindigkeit mit Passieren der Messsonde zunächst steil an, um danach wieder abzufallen. Längs der Schwallregion kommt es bei den Wasser/Luft-Schwallströmungen zu einem kontinuierlichen Abfall der Schwallgeschwindigkeit. Bei den Öl/Luft-Schwallströmungen kommt es dagegen zu einem geringen Anstieg der Schwallgeschwindigkeit zum Schwallende hin. In vielen Fällen konnte vor der eigentlichen Schwallfront die Existenz von Flüssigkeitströpfchen anhand der transienten Einzelsignale nachgewiesen werden. Unter Schwallgeschwindigkeit ist hier immer die mittlere Geschwindigkeit der Blasen im Messvolumen zu verstehen. Wird die Messsonde mit dem Messvolumen kurz oberhalb der unteren Rohrwand positioniert, so können lokale Geschwindigkeiten in der Flüssigkeitsphase gemessen werden. Als Tracer dienen jetzt die natürlichen Verschmutzungen in der Flüssigkeit.

Zusammenfassung

Zur Untersuchung von Schwallströmungen der Struktur Wasser/Luft und Exsol d80/Luft wurde eine faseroptische Messsonde auf Basis der Ortsfiltertechnik eingesetzt. Zuvor wurde an einer Laborapparatur die Signalerzeugung und Signalverarbeitung an sich bewegenden Einzelblasen erprobt. Die Messungen an den Schwallströmungen erfolgten an einer 217 m langen horizontalen Rohrleitung von SINTEF Petroleum Research, wobei die Messsonde in einem transparenten Testabschnitt mit dem Innendurchmesser von 0,0672 m positioniert wurde. Bei sämtlichen Untersuchungen steigt die Schwallgeschwindigkeit mit Passieren der Messsonde zunächst steil an, um danach wieder abzufallen. Längs der Schwallregion kommt es bei den Wasser/Luft-Schwallströmungen zu einem kontinuierlichen Abfall der Schwallgeschwindigkeit. Bei den Öl/Luft-Schwallströmungen kommt es dagegen zu einem geringen Anstieg der Schwallgeschwindigkeit zum Schwallende hin.

Danksagung

Die Autoren danken der Europäischen Union für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes mit der Projektnummer HPRI CT 1999 00091. Ebenfalls gedankt sei SINTEF Petroleum Research für die Bereitstellung der Versuchsanlagen und die kollegiale Zusammenarbeit.

Literatur

- Andreussi, P., Bendiksen, K.H., Nydal, O.J., 1993: Void Distribution in Slug Flow, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 19, No. 5, pp. 817-828
- Lewis, S., Fu, W.L., Kojasoy, G., 2002: Internal flow structure description of slug flow-pattern in a horizontal pipe, Int. J. Heat Mass Transfer 45, pp. 3897-3910
- Nogueira, S., Sousa, R.G., Pinto, A.M.F.R., Riethmuller, M.L., Campos, J.B.L.M., 2003: Exp. Fluids, Vol. 35, No. 6, pp. 598-609
- Oliemans, R.V.A., 1994: Multiphase Science and Technology for Oil/Gas Production and Transport, SPE 27958., pp. 9-32
- Petrak, D., 1997: Fibreoptical Flowmeter for Water Pipe Flows, Proc. 7th International Conference Laser Anemometry Advances and Applications, Sept. 8-11, 1997, Karlsruhe, pp. 379-385
- Petritsch, G., 1998: Experimentelle Untersuchung der Strömungsform in einer horizontalen Rohrstrecke mit nach oben gekrümmten Auslaß, Dissertation, Universität Hannover