

Meßtechnik für Mehrphasenströmungen

2. Workshop am 24. und 25.9.98 in Rossendorf

Andreas Schaffrath und Horst-Michael Prasser, Dresden

erschienen in: **atw 43 (1998), Heft 11, S. 706 - 708**

Initiatoren des zweiten Workshops zum Thema „Meßtechnik für stationäre und transiente Mehrphasenströmungen“ im *Forschungszentrum Rossendorf (FZR) e.V.* waren das *Institut für Sicherheitsforschung des FZR* und das *Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik (IPM)* an der *Hochschule für Technik, Wirtschaft und Sozialwesen (HTWS) Zittau/Görlitz*. Der Workshop wurde mit Unterstützung der *Deutschen Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie (Dechema) e.V.* sowie der *Kerntechnischen Gesellschaft (Fachgruppe Thermo- und Fluidodynamik)* veranstaltet. In drei Haupt- sowie 13 Fachvorträgen wurden optische Meßverfahren, Impedanzverfahren und Sondergebiete zur Messung wichtiger Größen in einer Zwei- oder Mehrphasenströmung (z.B. Phasenanteile, Partikelgrößen, Geschwindigkeiten, Stoffübergang an der Phasengrenze, Konzentration von Komponenten) vorgestellt.

Prof. F.-P. *Weiß* (FZR) begrüßte die 45 Teilnehmer aus Industrie, Forschungszentren sowie Hochschulen und wies auf den interdisziplinären Charakter der Veranstaltung zwischen der Verfahrens- sowie der Kerntechnik hin.

Prof. C. *Tropea* (*Universität Darmstadt*) berichtete in dem ersten Hauptvortrag über Neuentwicklungen bei optischen Meßverfahren. Bei der Entwicklung eines beliebigen Meßverfahrens ist die Vorgehensweise: (1) mathematische Beschreibung der Form und Verteilung der Tropfen, (2) mathematische Beschreibung der Lichtstreuung an den Partikeln - Modellierung des Detektorsignals bei Vorgabe der Meßgröße, (3) Auswahl der Beobachtungsparameter und Lösung der inversen Aufgabe - Rückrechnung von den beobachtbaren Größen auf die gesuchten Meßgrößen und (4) meßtechnische Umsetzung. Nach einer zusammenfassenden Darstellung der Meßaufgaben in einer Tröpfchenströmung und der derzeit zur Verfügung stehenden Laser-Meßtechnik (u.a. Laser-Doppler-Anemometrie - [LDA], Particle Imaging Velocimetry - [PIV], Regenbogenverfahren) lag der Schwerpunkt auf der Messung der Partikelgrößenverteilung (3-Detektor Phase Doppler Particle Analyser [PDPA], Dual Mode PDPA, Planar PDPA). Für sphärische Tröpfchen wurde der erreichte Stand der Modellierung von Reflexion und Lichtbeugung dargestellt und die Schwierigkeiten analysiert, die bei der Überlagerung verschiedener Reflexions- und Beugungsmoden auftreten können.

R. *Kulenovic* und M. *Groll* (*Universität Stuttgart*) verglichen in ihrem Vortrag mehrere Auswertemethoden der Laser-Speckle-Photographie (LSP). Nach einer Einführung in die vor allem in der Werkstofftechnik (Schwingungs- und Deformationsanalysen)

bzw. der Strömungsmechanik (Messung von Geschwindigkeiten, Drücken und Temperaturen) etablierten Meßmethode, konzentrierten sich die Autoren dann auf die Digitale Laser-Speckle-Photographie (DLSP). Hierbei werden die Specklegramme mittels CCD-Sensoren elektronisch erfaßt und mittels digitaler Bildverarbeitung ausgewertet. Das DLSP bietet gegenüber dem herkömmlichen LSP die Vorteile, daß nun die umständliche und fehlerbehaftete photographische Specklegramm-Aufnahme auf Filme und die optische Rekonstruktion abgelöst werden, gleichzeitig bedeutet dies aber auch eine deutliche Einschränkung des räumlichen Auflösungsvermögens (holographischer Film ca. 5000 Linien/mm, CCD-Sensor ca. 100 Linien/mm).

J. Kumpart, M. Michel, O. Fiedler und K. Chrisofori von der TU Hamburg-Harburg referierten über den Einsatz von Ortsfilterverfahren zur Bestimmung lokaler Geschwindigkeiten in Mehrphasenströmungen. Diese beruhen auf der räumlichen Filterwirkung gitterartiger Lichtempfängerstrukturen, die in Form einer Sonde in die Strömung eingebracht werden. Die Sonden werden in der Industrie vor allem zur Bestimmung von Geschwindigkeit und Länge von bewegten Oberflächen eingesetzt. Bei geeigneter Beleuchtung lassen sich so lokale Geschwindigkeiten in Mehrphasenströmungen mit hohen Feststoffkonzentrationen oder in optisch dichten Flüssigkeiten bestimmen.

Der Beitrag von S. Gomes, D. Pflieger, N. Gilbert und H.-G. Wagner beschäftigte sich mit der Strömung in Blasensäulen. Die Arbeit wurde im Rahmen des EU Admire (Advanced Design Methods for Improved Performance of Industrial gas-liquid Reactors)-Programms durchgeführt, an dem zahlreiche Partner aus Forschung und Industrie aus diversen Ländern beteiligt sind. Die experimentellen Strömungsuntersuchungen wurden an einer rechteckigen Blasensäule (Höhe 1 m, Breite 0,2 m, Tiefe 0,05 m) durchgeführt. In der Blasensäule kommt es zur Herausbildung einer instationären Strömung. Zeitliche Verläufe der Geschwindigkeiten wurden mit Hilfe von Ultraschall sowohl für die Gasphase (Dopplereffekt bei der Reflexion des Schall an den Blasen) als auch für die Flüssigkeitsphase (Laufzeit des Durchschallungssignals) gemessen.

F. Hensel (FZ Rossendorf) beschrieb in seinem Vortrag die Anwendung der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) zur Untersuchung von Zweiphasenströmungen. PET ist ein in der Nuklearmedizin weit verbreitetes bildgebendes Verfahren, das hier die selektive Verfolgung von Stoffwechselprozessen gestattet und nun für nicht-medizinische Anwendungen geeignet modifiziert wurde. Die als Tracer verwendeten PET Nuklide C-11, N-13, O-15 sowie F-18 erlauben die Markierung einer Vielzahl von organischen Substanzen, ohne deren physikalische und chemische Eigenschaften zu verändern. Der Autor beschrieb ein Experiment zur Bestimmung der Gasgehaltsverteilung in einer Blasensäule mit Hilfe eines Tracers. Dabei wurde die Ausbreitung einer Tracerwolke in einer Blasenströmung untersucht. Aus den Meßergebnissen wurde der Dispersionskoeffizient des Tracers in der Blasenströmung bestimmt. Die Experimente wurden in einer engen Küvette durchgeführt, die sich im Zentrum einer Doppelkopf-PET-Kamera befand. Unterschiedliche Blasengrößenverteilungen wurden durch die Injektion von Luft bzw. durch Gasproduktion mit einer H_2O_2 Zersetzungsreaktion erzeugt. Die Auswertung basiert auf einer Mittelebenen-Rückprojektion der registrierten Ereignisse.

V. *Teschendorff (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit)* spezifizierte im zweiten Hauptvortrag den Bedarf an detaillierten Messungen von Zweiphasenströmungen für die Codeentwicklung aus dem Blickwinkel der Reaktorsicherheitsforschung. Hierbei verweist der Autor auf die Notwendigkeit zur Weiterentwicklung der Simulationstechnik über den Stand heutzutage verwendeter eindimensionaler Systemcodes (z.B. Athlet, Relap), deren Aussagesicherheit bei mehrdimensionalen und komplexen Strömungsformen begrenzt ist, hinaus. Fortschritte sind hier durch den Einsatz von Computational Fluid-Dynamic (CFD)-Codes zu erwarten, deren Vorteil in der Skalierbarkeit besteht. Ein einmal validiertes Modell kann auf unterschiedliche Geometrien angewendet werden, weil geometrische Details durch feine Nodalierungen erfaßt werden können. Die zur Validierung der CFD-Codes benötigten Experimente sollen so mit Meßtechnik instrumentiert werden, daß es gelingt, die turbulente zweiphasige Strömung selbst transient räumlich detailliert zu erfassen, so daß sich die mehrdimensionalen Modelle der CFD-Codes validieren lassen. Hierzu sind als Größen zu messen: die gemittelten Geschwindigkeitskomponenten beider Phasen in den drei Koordinatenrichtungen, die gemittelten Drücke, Temperaturen, Dichten, Volumenanteile und Reynoldsspannungen beider Phasen, sowie diverse Größen zur Beschreibung der Phasengrenze wie Blasen- bzw. Tropfendurchmesser oder die Position freier Oberflächen. Abschließend leitete der Autor die Anforderungen an die räumliche und zeitliche Auflösung am Beispiel des heißen Stranges eines Druckwasserreaktors ab.

A. *Breuer (TSI Aachen)* berichtete über einen optischen Patternator, ein planares Laser-induziertes Fluoreszenzverfahren (LIF)-Verfahren zur schnellen Charakterisierung der Güte von Einspritzdüsen (Massenstrom und Größenverteilung der Blasen). Mit Hilfe der Meßmethode LIF wurde ein leistungsfähiger Teststand zur Überwachung eines Fertigungsprozesses aufgebaut. Bei LIF wird die Strahlung eines Lasers planar aufgeweitet. Mit diesem Laserlicht werden die in einer Ebene des Strahles befindlichen Tropfen zur Emission von Fluoreszenzlicht angeregt. Anhand der Lichtintensität, die mittels einer CCD Kamera gemessen wird, wird eine Bestimmung der Tropfenvolumina vorgenommen. Neben einer Beschreibung der technischen Einzelheiten des Teststandaufbaus präsentierte der Autor zahlreiche Anwendungsbeispiele.

K. *Mühlfriedel* und K.-H. *Baumann (Universität Halle)* präsentierten in ihrem Vortrag die Anwendung der laserinduzierten Fluoreszenztechnik (LIF) auf die Untersuchung von Stofftransportvorgängen an fluiden Phasengrenzen. LIF beruht auf dem Effekt, daß die Intensität des von einem gelösten Fluoreszenzfarbstoffes emittierten Lichtes direkt proportional zur Konzentration des Farbstoffes im Lösungsmittel ist. Hierbei wird die Fluoreszenz mittels eines Laser-Lichtschnittes angeregt. Das Verfahren erlaubt somit den instationären Transport des gelösten Fluoreszenzfarbstoffes (Tracer) zwischen einer wäßrigen und einer organischen Phase zu visualisieren, die sich hierbei einstellenden Konzentrationsprofile zu bestimmen und die Stoffübergangskoeffizienten zu berechnen.

H. Benk und R. Loth (TU Darmstadt) referierten über die Bestimmung lokaler Strömungs- und Turbulenzgrößen in Wasser-Luft-Zweiphasenströmungen mit X-Heißfilmsonden. Dieser Sondentyp eignet sich zur simultanen Bestimmung von zwei Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit. Je nach Strömungstyp (niedrig- oder hochturbulent) kommen zur Auswertung entweder die auf einer Reihenentwicklung erster Ordnung basierende "Summen-Differenzen"-Methode oder die "Multipositionsmethode" zum Einsatz. Bei beiden Methoden ist eine Aufbereitung der Meßsignale (Heraustrennen der aus der Gasphase herrührenden Anteile des Signalverlaufes) notwendig.

R. Hampel, W. Kästner, A. Fenske und S. Schefter (HTWS Zittau) berichteten über die Anwendung modellgestützter Meßverfahren (MMV) für die Bestimmung von Füllständen in Druckbehältern mit Zweiphasengemischen. Die gängigen Verfahren der Füllstandsmessung können insbesondere bei transienten Vorgängen große Meßfehler aufweisen. Grundlage für die Anwendung von MMV ist ein physikalisch approximiertes Zustandsmodell für die Beschreibung der dynamischen Systemprozesse mit Hilfe Fuzzy-basierter Algorithmen. Hierbei erfolgt die Anpassung zwischen dem realen Prozeß und dem Modell auf Grundlage meßbarer Ein- und Ausgangsgrößen, wobei in Abhängigkeit von der Art der Strömung unterschiedliche Korrekturen verwendet werden. Somit kann bei Übereinstimmung der meßbaren Größen von Modell und Prozeß auf die Richtigkeit der nichtmeßbaren Zustandsgrößen geschlossen werden.

J. Liebert und H.-P. Gaul (Siemens AG/KWU) referierten über die Messung von Dampfgehalt, Phasenmassenströmen sowie Strömungsformen in der UPTF (Upper Plenum Test Facility in Mannheim)-Anlage mit sogenannten Pipe-Flow-Metern. Die in den USA entwickelten Meßsysteme bestehen aus einer dreistrahligen γ -Dichtemessung, vier am Rohrumfang angeordneten Strömungskraftaufnehmern (sogenannten Paddles) sowie einer Druck- und Temperaturmessung. Die Zweiphasenparameter werden aus den Meßwerten mit Hilfe speziell entwickelter und auf Strömungsmodellen basierender Algorithmen berechnet. Die Autoren haben das Meßsystem in großen horizontalen Leitungen mit DN 350 (Volumenausgleichsleitung) bzw. DN 750 (heißer Strang) eingesetzt und hierbei eine gute Übereinstimmung mit den übrigen Messungen festgestellt.

Die Sitzung zu den Impedanzverfahren wurde mit dem Hauptvortrag von Herrn Prof. D. Mewes (Universität Hannover) über die Berechnung und Visualisierung von zweiphasigen Strömungen in Packungen und Blasensäulen eröffnet. In Rieselbetten bzw. Blasensäulen werden im Betrieb Instabilitäten beobachtet, die mit Schwankungen beim Stoff- und Wärmetransport verbunden sind. In Rieselbetten werden die Instabilitäten durch den Übergang von der Riesel- zur pulsierenden Strömung hervorgerufen, in Blasensäulen hingegen beim Übergang von der homogenen Blasenströmung in eine inhomogene. Für kleine Volumenströme ist die Aufstiegs geschwindigkeit der dispergierten Blasen orts- und zeitunabhängig. Mit Steigerung des Gasvolumenstromes bilden sich Zirkulationsströmungen mit mehreren übereinander angeordneten Zellen, aus. Die theoretischen Modelle sagen voraus, daß bei höheren Gasvolumenströmen Rückströmungen in Nähe der Behälterwand auftreten. Hierdurch werden die in diesem Bereich aufsteigenden Gasblasen mit nach unten geris-

sen. Folglich vergrößert sich der Gasvolumenanteil im aufwärts gerichteten Anteil des Strömungsquerschnittes. Es kommt zur Koaleszenz und mit wachsendem Blasendurchmesser zum Anstieg der Aufstiegs geschwindigkeit. Die zuvor theoretisch berechneten Instabilitäten wurden mit Hilfe eines elektrisch tomographischen Meßverfahrens mit einer hohen Zeit- sowie Ortsauflösung nachgewiesen. Die kapazitiven Sensoren bestehen aus drei eng beieinander liegenden und um 120° verdrehten Ebenen, in denen je 59 parallele Drähte gespannt sind. Zwischen zwei benachbarten Drähten einer Ebene wird die Leitfähigkeit gemessen. Mit Hilfe der hintereinander angeordneten Ebenen werden drei linear unabhängige Projektionen der Phasenverteilung aufgenommen. Anschließend wird daraus die Phasenverteilung über dem Rohrquerschnitt rekonstruiert. Weiter berichtete der Autor über den Einsatz eines Kapazitätstomographen in einem Festbettreaktor. Dieser kann nur bei nichtleitendem Schüttgut verwendet werden. Der Kapazitätstomograph besteht aus 16 am äußeren Umfang befestigten Elektroden. Bei den Messungen wird die Kapazität zwischen Elektrodenpaaren aufgenommen.

P. Horner, A. Zeisberger und F. Mayinger (*Technische Universität München*) stellten anschließend ein kapazitives Meßverfahren zur Bestimmung des transienten Dampfgehaltes in komplexen Geometrien (hier: Kugelschüttungen) vor. Bei dem Meßverfahren werden die Unterschiede der Dielektrizitätskonstante von Wasser und Dampf genutzt. Unter Berücksichtigung von Kalibriermessungen wird der Zusammenhang zwischen der gemessenen Kapazität und dem Dampfgehalt bestimmt. Die Elektroden sind für diesen Anwendungsfall als Stahlkugeln ausgeführt, die gegenüber dem sie umgebenden und geometrisch gleichen Schüttgut elektrisch isoliert sind. Hierdurch wird die Beeinflussung der Strömung minimiert. Kalibriermessungen an einer Blasensäule mit Wasser und R134a zeigen Abweichungen gegenüber Messungen mit einem γ -Densitometer von weniger als 6%. In der Versuchsschüttung wurden simultan 5 Dampfgehaltssonden eingesetzt, die große lokale Schwankungen der Strömung und des Dampfgehaltes detektierten, ohne jedoch die Strömung selbst zu beeinflussen.

F. Dräger, S. Fleischer, R. Hampel (*Hochschule für Technik, Wirtschaft und Sozialwesen Zittau/Görlitz*) und H.-M. Prasser (*FZR*) berichteten über kapazitive Meßverfahren zur Bestimmung von Parametern einer Zweiphasenströmung sowie die Anwendung von Neuro- bzw. Fuzzy-Methoden bei der Auswertung. Die Autoren stellten zunächst einen Sensor mit einem Elektrodenpaar vor, mit dem Taylorblasen in dünnen Rohrleitungen detektiert wurden. Ein Kapazitätssensor besteht aus zwei Elektroden. Dieses Verfahren erlaubt ferner die Messung der Gasblasengeschwindigkeit, der Blasenlänge sowie des Gasgehalts. Ein Vergleich mit Leitfähigkeitssonden zeigt eine gute Übereinstimmung. In dem zweiten Teil des Vortrages wurden Messungen mit einem Kapazitätstomographen an der Zweiphasentestschleife des Forschungszentrum Rossendorf mit einer Reihe anderer Meßverfahren (Gittersensor, Ultraschall, Gamma-Durchstrahlung, Nadelsonden und Radarverfahren) verglichen. Bei der Auswertung wurden Mustererkennungsverfahren mit einer intelligenten Datenanalyse angewendet. Hierzu zählen Neuronale Netze mit überwachten und unüberwachten Lernverfahren als auch Fuzzy-Clusterverfahren.

T. Kern (FZR) berichtete über den Einsatz nadelförmiger Leitfähigkeitssonden für die Charakterisierung von Schaum am Beispiel einer von unten mit Luft begasten wäßrigen Alkohollösung in einer Blasensäule mit einem Durchmesser von 100 mm. Die sich hierbei einstellende, mehrere Zentimeter hohe Schaumschicht wurde mit Hilfe nadelförmiger Leitfähigkeitssonden axial vermessen. Im Vorfeld der Experimente war hierzu jedoch eine umfangreiche Verbesserung der Nadelsonde sowie eine Weiterentwicklung der Meß- und Auswertetechnik nötig. Die Kalibrierung der Nadelsonden hinsichtlich des Gasgehalts erfolgte mit Hilfe von Referenzmessungen mit einem γ -Densitometer. Die Messungen zeigen, daß Nadelsonden auch im Schaumbereich verlässliche Angaben über Gasgehalt und Blasengröße liefern und somit neue Erkenntnisse über die Vorgänge im Schaum und wichtige Eingangsgrößen für eine angestrebte Modellentwicklung bereitstellen.

Der letzte Vortrag des Workshops wurde von H.-M. Prasser (FZR) gehalten. Der Autor berichtete über die Möglichkeiten zur Messung von Blasengrößenverteilungen mit einem Gittersensor. Die hohe zeitliche Auflösung von 1024 Bilder/s der in Rossendorf entwickelten Sensoren erlaubt es, mehrere Schnittbilder einzelner Gasblasen bei deren Durchgang durch die Meßebeine zu erhalten. Bei bekannter Strömungsgeschwindigkeit kann so deren Volumen ermittelt werden. Dazu dient ein rekursiver Füllalgorithmus, der, beginnend bei einem der Blase zuzuordnenden Startpunkt im Meßdatenmassiv, die Summation der lokalen Gasanteile realisiert, die an den von der Blase berührten Meßpunkten registriert wurden.

Insgesamt verlief der Workshop in einer angenehmen und angeregten Atmosphäre, die Raum für viele Diskussionen, auch am Rande der Veranstaltung, ließ. Die Beiträge werden in einem Tagungsbericht zusammengefaßt, der als Report des Forschungszentrums Rossendorf erscheint.

Anschrift der Verfasser:

Dr.-Ing. Andreas Schaffrath und Dr.-Ing. Horst-M. Prasser
Forschungszentrum Rossendorf (FZR), Institut für Sicherheitsforschung (FWS)
Postfach 51 01 19, 01314 Dresden