

Ermittlung der Geschwindigkeitsverteilung von Feststoffpartikeln in einer Mehrphasenströmung mit Hilfe der Particle Image Velocimetry

L. Gui, S. Hilgers, A. Karthaus, W. Merzkirch

Universität GH Essen
Lehrstuhl für Strömungslehre
Schützenbahn 70, 45117 Essen

Einleitung

Blasensäulen-Reaktoren dienen dazu, für eine gewisse Zeit zwischen zwei oder drei Phasen einen intensiven Kontakt herzustellen und dabei eine Austauschreaktion zu ermöglichen. In Blasensäulen-Reaktoren mit suspendierter, fester Phase (Deckwer und Schumpe, 1985) erfolgt der Austausch meistens zwischen der festen und flüssigen Phase, während die eingebrachten Gasblasen der Agitation und Homogenisierung dienen. Der Reaktor ist so auszulegen, daß die Durchmischung der festen und flüssigen Phasen möglichst intensiv und homogen ist, wobei man mikroskopische und makroskopische Mechanismen unterscheiden muß.

Makroskopische Strukturen der Strömung lassen sich mit Hilfe der Particle Image Velocimetry (PIV) erkennen, die zu einem Zeitpunkt die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten in einer Lichtschnittebene liefert (Merzkirch, 1990; Adrian, 1991; Hinsch, 1993). Für Messungen in einer Mehrphasenströmung muß nach einer Möglichkeit gesucht werden, die Signale, die von den unterschiedlichen Phasen stammen, zu trennen. Erste Lösungsvorschläge für Messungen in einer Zweiphasenströmung sehen die Verwendung von fluoreszierenden Partikeln vor (Sridhar et al., 1991).

Gelingt eine solche Trennung, insbesondere für die Dreiphasenströmung, wie sie in dem hier betrachteten Reaktor vorliegt, könnte auch die Verteilung der Phasen ermittelt werden. Hierbei interessiert, wie eine Variation in der Verteilung der Phasen das Strömungsfeld bzw. den Mischvorgang beeinflusst. Bevor solche Untersuchungen, z.B. als Parameter-Studien, durchgeführt werden können, ist es erforderlich, die Particle Image Velocimetry für die Anwendung auf dieses Mehrphasen-Strömungsproblem weiterzuentwickeln. Solche Weiterentwicklungsschritte sind notwendig in bezug auf die PIV-Aufnahmetechnik und die Auswertungsmethoden.

Der Laserstrahl wird mit einer Linse zu einem Lichtschnitt aufgeweitet, so daß aus dem Fluidelement eine Ebene selektiert wird, von der ein Ausschnitt auf den beiden CCD-Kameras abgebildet wird. Die Schwarzweiß-CCD-Kamera für die Aufnahme der fluoreszierenden Partikeln, wird mit einem Farbfilter versehen, so daß nur das Streulicht der fluoreszierenden Partikeln den Chip erreicht. Die Farb-CCD-Kamera zeichnet die gesamte Strömungsszene simultan auf.

Hierfür sind beide Kameras auf einen identischen Bildausschnitt zu fixieren. Das erfolgt mit Hilfe eines semitransparenten Spiegels, der im 45° Winkel zwischen den Kameras montiert ist. Die Steuerung der CCD-Kameras und die Digitalisierung der PIV-Aufnahmen findet mittels PCs statt, so daß eine Auswertung der Ergebnisse unmittelbar erfolgen kann.

Auswertung

Die Auswertung der Feststoffphase (große fluoreszierende Partikeln) erfolgt entweder durch Verwendung des roten Kanals der Farb-CCD-Kamera oder durch die Schwarzweiß-CCD-Kamera mit vorgesetztem optischen Filter. Sie erfolgt mit einer von Gui (1995) weiterentwickelten Particle-Tracking-Technik. Es werden nicht nur die Positionen der Partikeln in der Aufnahme ermittelt, sondern außerdem zur besseren Unterscheidung von anderen Partikeln die Größe (Fläche) F , die Helligkeit H , und die Rundheit Θ jedes Partikelbildes. Beim Tracking der Partikeln zwischen zwei PIV-Aufnahmen kann eine Tracking-Funktion $\Gamma_g(l_1, l_2)$ wie folgt definiert werden:

$$\Gamma_g(l_1, l_2) = \mathbf{x}_F \left[\frac{F_1(l_1) - F_2(l_2)}{F_1(l_1)} \right]^2 + \mathbf{x}_H \left[\frac{H_1(l_1) - H_2(l_2)}{H_1(l_1)} \right]^2 + \mathbf{x}_\Theta \left[\frac{\Theta_1(l_1) - \Theta_2(l_2)}{\Theta_1(l_1)} \right]^2 \quad (1)$$

Hier sind l_1, l_2 die Partikelnummern in der ersten und zweiten PIV-Aufnahme. \mathbf{x}_F , \mathbf{x}_H und \mathbf{x}_Θ sind Wichtungskoeffizienten. Erreicht die Funktion Γ_g einen minimalen Wert, dann sind die beiden Abbildungen einer Partikel gefunden.

Zur Untersuchung der Bewegung der Feststoffpartikeln in der Wasserströmung eignen sich besonders die mit der CCD-Kamera und vorgesetztem optischen Filter aufgenommenen PIV-Aufnahmen. Damit wird nur die Streulichtinformation der fluoreszierenden großen Partikeln abgebildet, siehe Abb. 2.

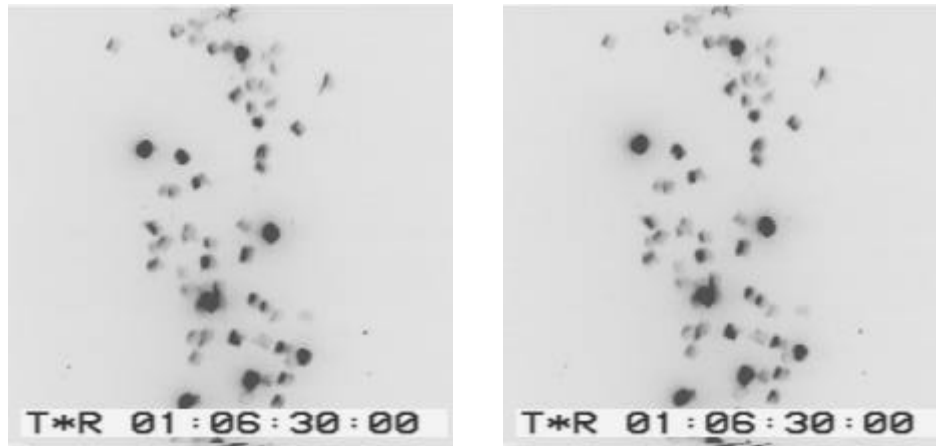


Abb. 2: PIV-Videoaufnahmen mit optischem Filter

Je nachdem, ob sich die Partikeln zum Zeitpunkt der Aufnahme in der Mitte oder am Rand des Lichtschnitts befanden, werden sie unterschiedlich groß abgebildet. Die Partikeln werden mit der Particle-Tracking-Technik ausgewertet, siehe Abb. 3. Es werden hier 13 Partikeln identifiziert. Die Information über die Positionen der Partikeln und die Richtung der Geschwindigkeit läßt sich gut erkennen, der Betrag wird durch die Länge der Pfeile und die verschiedenen Grautöne verdeutlicht.

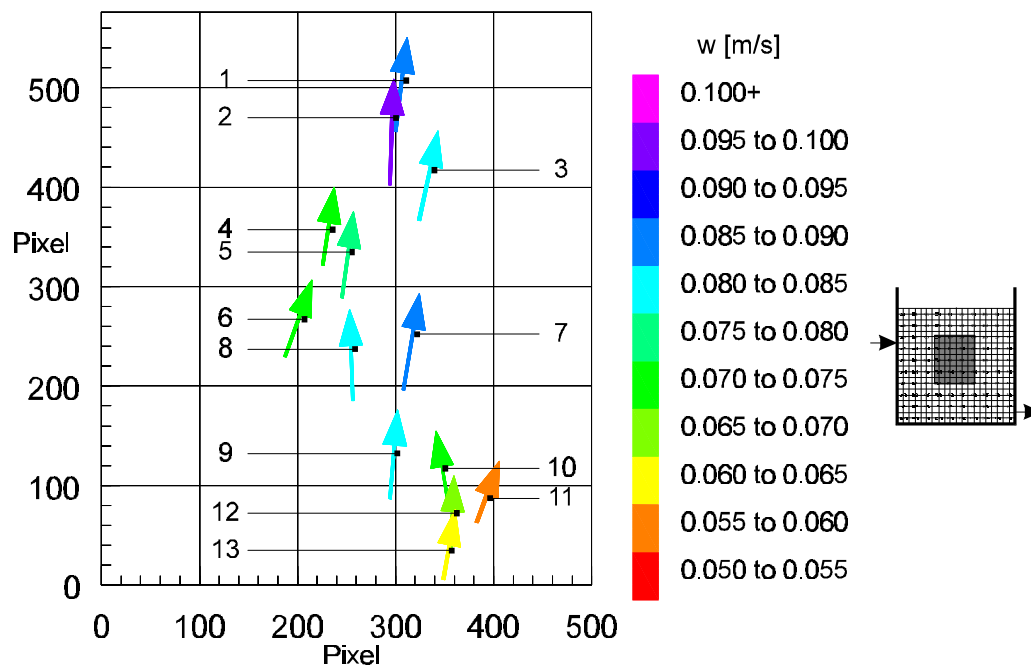


Abb. 3: Geschwindigkeitsverteilung der Feststoffpartikeln

In Abb. 4 ist die Entwicklung der vertikalen und horizontalen Komponente der Geschwindigkeit dreier Partikeln über die Zeit aufgetragen. Dies ist durch die Auswertung mit Hilfe der Particle-Tracking-Technik möglich, da die gefundenen Partikeln numeriert werden und somit über eine beliebige Anzahl von PIV-Videoaufnahmen verfolgt werden können.

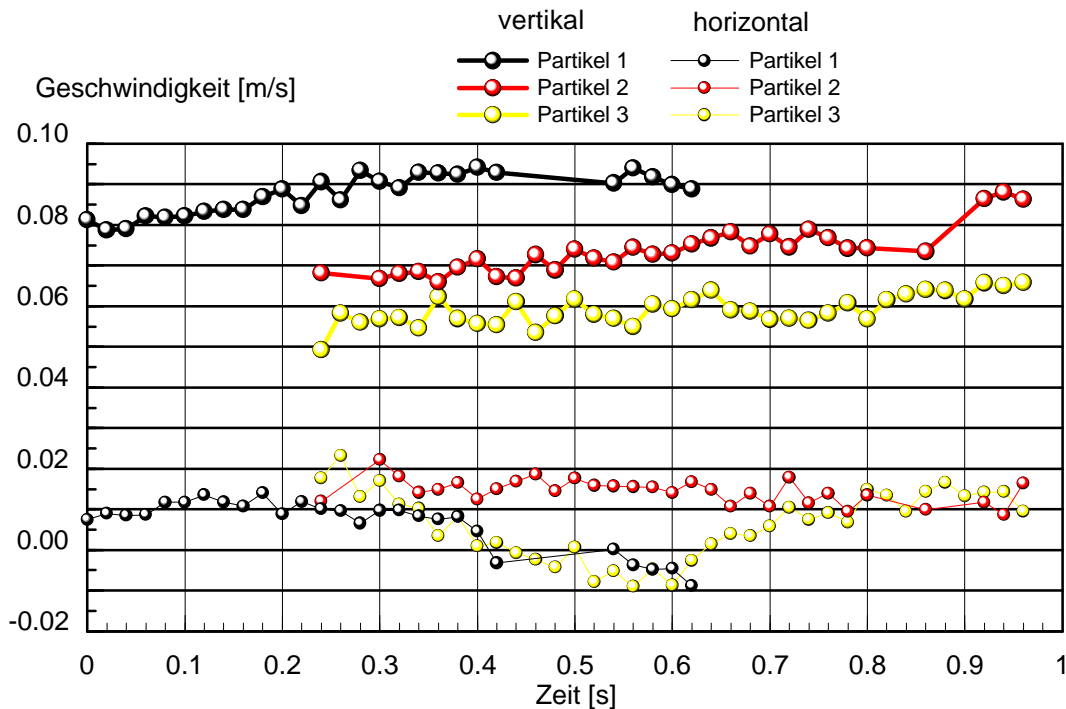


Abb. 4: Geschwindigkeitsverlauf dreier Partikeln in Abhängigkeit von der Zeit

Bei den Dreiphasenexperimenten werden die großen Partikeln durch das Loch im Behälterboden mit Hilfe der Luftblasen in den Mehrphasentank eingebracht. Untersucht man über mehrere Bilder die Entwicklung der Geschwindigkeit der großer Partikeln, so erkennt man in Abb. 5 den Anstieg der vertikalen Komponente im Vergleich zur Zweiphasenströmung von maximal 0,10 m/s auf bis zu 0,26 m/s.

Die Abnahme der Geschwindigkeit über die Zeit erklärt sich damit, daß die Partikeln aus der Blasenströmung ausgetrieben werden. Sie werden durch die Wasserströmung nach kurzer Zeit wieder auf die Aufstiegs geschwindigkeit gebremst, die sich aufgrund der Auftriebskräfte und der umgebenen Wasserströmung ergibt. Am deutlichsten ist dies bei Partikel 3 zu sehen, es kommt hierbei sogar am Ende zu einer Gleichverteilung der horizontalen und vertikalen Komponente der Geschwindigkeit.

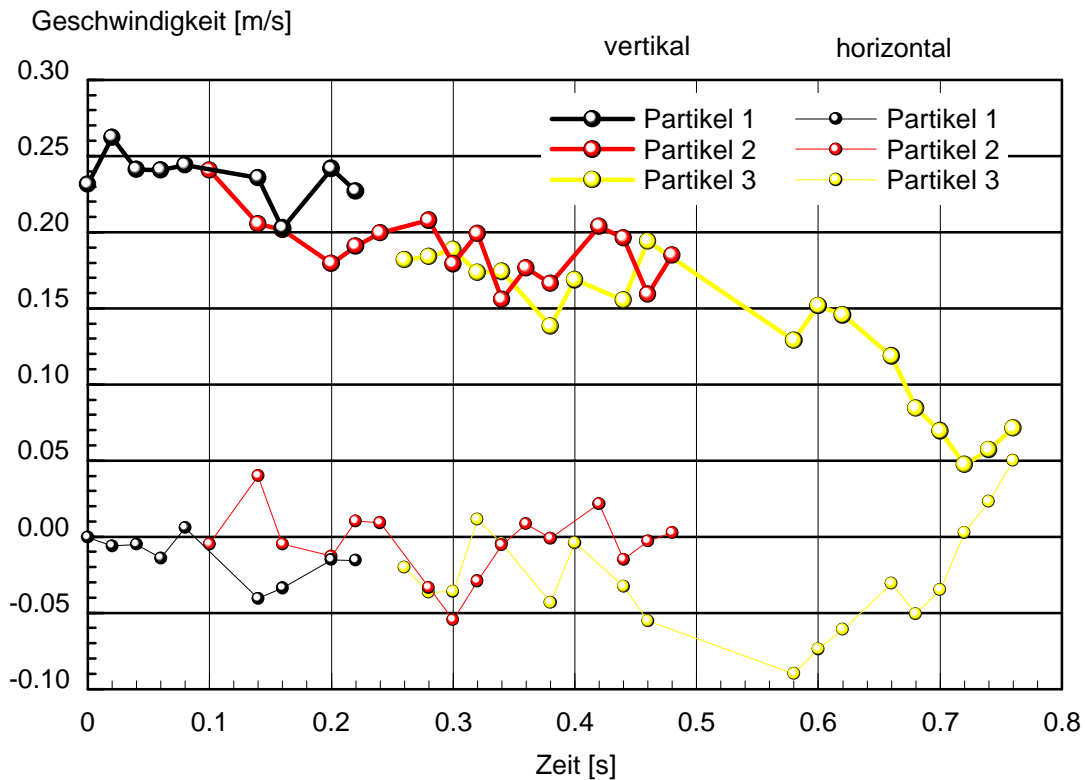


Abb. 5: Geschwindigkeitsverlauf dreier Partikeln in Abhängigkeit von der Zeit

Zusammenfassung

Der hier benutzte Reaktortank wird von der flüssigen Phase kontinuierlich durchströmt; die feste Phase wird zusammen mit der Gasphase (Luftblasen) am Reaktorboden eingegeben. Die Analyse instationärer Strömungen erfolgt durch die direkte Aufzeichnung mit einer CCD-Kamera, deren Bildinformationen über einen beliebigen Zeitraum auf Videoband zwischengespeichert werden können.

Bei der Verwendung von fluoreszierenden Partikeln erfolgt die Trennung sowohl durch Verwendung optischer Filter, die während der Messung vor die CCD-Kamera gebracht werden, als auch durch eine Farb-CCD-Kamera, bei der das Farbsignal zerlegt wird und somit die Information aller beteiligten Phasen erhalten bleibt. Die weiterentwickelte Particle-Tracking-Technik wertet innerhalb der PIV-Aufnahme nur dort aus, wo Partikeln lokalisiert werden. Eine Numerierung ermöglicht dann die Verfolgung der Partikeln über mehrere Bilder. Durch eine weitere Verarbeitung der Meßdaten lassen sich Aussagen über Konzentrations- und Größenverteilungen der Partikeln machen.

Literaturverzeichnis

- Adrian, R.J. 1991: Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. Annu. Rev. Fluid Mech. 23, 261-304
- Deckwer, W.-D.; Schumpe, A. 1985: Blasensäulen-Erkenntnisstand und Entwicklungstendenzen. Chem.-Ing.-Tech. 57, Nr. 9, 754-767
- Gui, L. 1995: Die Minimum-Quadratdifferenz-Methode, eine Auswertung von digitalen PIV-Aufnahmen durch das Tracking der Partikelbildstruktur. Arbeitsbericht, Universität Essen
- Hinsch, K.D: 1993: Particle image velocimetry. Speckle Metrology, 235-323, Marcel Dekker, New York, USA
- Merzkirch, W. 1990: Laser-Speckle-Velocimetrie. In: Lasermethoden in der Strömungsmechanik, (Hrsg. Ruck, B.), 71-97, AT-Fachverlag, Stuttgart
- Sridhar, G.; Ran, B.; Katz, J. 1991: Implementation of particle image velocimetry to multi-phase flow. Cavitation and Multiphase Flow Forum, FED 109, 205-210

Die Untersuchungen erfolgten mit finanzieller Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG Az. Me 484/22).

Lasermethoden in der Strömungstechnik***5. Tagungsband von GALA e.V. (1996)******Herausgeber:******B. Lehmann, K. Graichen, B. Ruck, A. Leder, D. Dopheide******veranstaltet von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie******GALA e.V.******Shaker Verlag, Aachen***