

Analyse der Hydrodynamik in Blasenströmungen mit einer Bildverarbeitungsmethode

O. Borchers, C. Busch und G. Eigenberger
Institut für Chemische Verfahrenstechnik, Universität Stuttgart,
Böblinger Str. 72, D-70199 Stuttgart

Zusammenfassung

Es wird eine Messtechnik vorgestellt, die eine simultane Bestimmung von Blasengröße und -geschwindigkeit sowie Flüssigkeitsgeschwindigkeit in optisch transparenten Blasenströmungen ermöglicht. Hierfür werden Bildsequenzen der Zweiphasenströmung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Die Flüssigkeitsströmung wird mit zugesetzten Tracerpartikeln visualisiert. Die Auswertung erfolgt off-line mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung. Zur Berechnung der Geschwindigkeiten wird Particle Tracking Velocimetry (PTV) eingesetzt. Dieses Verfahren beruht auf der Verfolgung einzelner Objekte in den Bildfolgen.

1 Einführung

Für nicht invasive Messungen in Zweiphasenströmungen werden zahlreiche Messtechniken eingesetzt. Am gebräuchlichsten sind die optischen Verfahren Laser Doppler Anemometrie (LDA) bzw. Phasen Doppler Anemometrie (PDA) und verschiedene Bildverarbeitungsmethoden (z. B. Particle Image Velocimetry, PIV und Particle Tracking Velocimetry, PTV).

Mittels LDA können Partikelgeschwindigkeiten zeitaufgelöst in optisch transparenten Medien gemessen werden. Je nach Konfiguration des Anemometers werden die Geschwindigkeitsvektoren in einer bis drei Dimensionen an einzelnen Punkten der Strömung bestimmt. Um Flüssigkeitsgeschwindigkeiten zu messen, müssen sich Partikel (Verunreinigungen oder zugesetzte Tracer-Teilchen) im Fluid befinden, die der Bewegung der Flüssigphase folgen. Genauso wie Tracer-Partikel erzeugen auch Blasen ein auswertbares Signal. Das Problem besteht nun darin, die Signale der Partikel von denen der Blasen zu trennen. Hierzu werden in der Literatur verschiedene Ansätze genannt [6], [8]. Diese Verfahren wurden bisher nur auf Einzelblasen angewandt, der Einsatz in Blasenströmungen ist umstritten [3].

Der PDA liegt das gleiche Messprinzip zugrunde wie der LDA, neben der Geschwindigkeit wird aber simultan die Größe des Teilchens gemessen. Diese Information kann prinzipiell dazu benutzt werden, zwischen Tracer-Partikel-Signalen und Blasen-Signalen zu unterscheiden. Bei der Bestimmung der Teilchengröße wird Kugelform vorausgesetzt, was bei den in Gas-Flüssigkeitsströmungen typischen Blasen mit Durchmessern über 3 mm nicht der Fall ist. Es werden Versuche unternommen, PDA-Messungen auf diesen Bereich auszudehnen; die bisher bekannt

gewordenen Ergebnisse sind aber auf Blasen im Größenbereich bis etwa 1 mm beschränkt [7].

Digitale Bildverarbeitung ermöglicht im Gegensatz zum Punktmessverfahren LDA die zeitaufgelöste Bestimmung zweidimensionaler Geschwindigkeiten in einem flächenhaften Bildausschnitt. Zur Berechnung der Geschwindigkeitsfelder werden vor allem Particle Image Velocimetry (PIV) und Particle Tracking Velocimetry (PTV) angewandt.

Bei der PIV wird ein Gitter über den aufgenommenen Bildausschnitt gelegt und mit Korrelationsmethoden die mittlere Geschwindigkeit in jedem Gitterfenster berechnet [1]. Die Flüssigphase wird mit Tracerpartikeln visualisiert, die sich in einem Laser-Lichtschnitt bewegen. Die Blasen werden durch direkte Reflexion des Lichtes an einem Punkt der Blasenoberfläche detektiert. Zur Phasendiskriminierung können z. B. fluoreszierende Tracerpartikel in Verbindung mit Interferenzfiltern und einer Zwei-Kamera-Technik eingesetzt werden. Da – wie bei der LDA – das an einem Punkt der Blasenoberfläche reflektierte Lichtsignal ausgewertet wird, beeinflusst die Blasenverformung das Ergebnis. Eine andere Möglichkeit ist die Unterscheidung zwischen beiden Phasen mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden [5]. In diesem Fall wird mit einer Schattentechnik gearbeitet, so dass man die vollständige Blasenkontur erhält; die Oberflächenverformung beeinflusst das Ergebnis dann nicht.

PTV beruht auf der Verfolgung einzelner Objekte (Blasen oder Tracerpartikel) im Bildausschnitt über aufeinander folgende Bilder der Sequenz. Somit werden die Bahnen mit der momentanen Geschwindigkeit des Objektes berechnet. Zur Beleuchtung kann prinzipiell Streulicht – wie bei der PIV üblich – oder Gegenlicht eingesetzt werden.

Das hier vorgestellte Verfahren arbeitet mit der Gegenlicht-Methode, Blasen und Tracerpartikel werden mit speziellen Algorithmen der Bildverarbeitung getrennt. Die Blasengrößen können nach der Phasendiskriminierung direkt ermittelt werden. Zur Berechnung der Geschwindigkeitsfelder wird ein PTV-Verfahren verwendet. Beide Schritte werden automatisiert für jeweils eine Bildsequenz durchgeführt.

2 Zweiphasen-PTV

Die Phasen einer Blasenströmung werden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera simultan erfasst. Zur Visualisierung der Flüssigkeit werden dem Fluid Tracerpartikel beigemischt. Die Auswertung der gespeicherten Bildsequenzen erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird eine Objekterkennung (Segmentierung) durchgeführt, d. h. Blasen bzw. Tracerpartikel werden vom Hintergrund getrennt. Anschließend werden die Objekte in den aufeinander folgenden Bildern identifiziert. Diese Objektverfolgung ('Tracking') erfolgt getrennt für beide Phasen.

2.1 Objekterkennung

Für die Objekterkennung wird ein mehrstufiger Algorithmus verwendet, der auf der Detektion lokaler Unterschiede der Grauwerte in den Bildsequenzen basiert [2]. Danach haben die Bilder binäres Format, unterschieden wird nur in Objektpunkte und Hintergrundpunkte. Um diese Stufe der Auswertung automatisiert über einzelne Bildsequenzen ablaufen zu lassen, müssen geeignete Bilder aufgenommen werden. Dabei sind insbesondere Abschattungseffekte

und Probleme beim Segmentieren durch Überlappungen von Blasen in der zweidimensionalen Kameraprojektion zu minimieren.

Abschattungseffekte

Das einfallende Licht wird durch mehrfache Reflexion und Brechung an den Phasengrenzflächen zwischen Blasen und Flüssigkeit abgeschwächt. Diese Abschattung durch Blasen hängt stark von der Divergenz der verwendeten Lichtquelle ab. Der Divergenzwinkel bezeichnet die maximale Abweichung der Lichtstrahlen von der optischen Achse. In Abb. 1 sind Aufnahmen für vier verschiedene Divergenzwinkel dargestellt. Um die Lichtabschwächung durch Blasen gering zu halten, muss demnach ein großer Divergenzwinkel, also möglichst diffuses Licht verwendet werden.

Erkennung überlappender Objekte

In der zweidimensionalen Kameraprojektion überlappen sich Objekte aus unterschiedlichen Tiefenpositionen des Messvolumens (siehe Abb. 1 und 2). Bei Verwendung eines geeigneten Objektivs mit entsprechenden Einstellungen kann die Schärfentiefe klein gewählt werden, so dass nur ein in der Tiefe schmaler Bereich des Volumens scharf dargestellt wird. Blasen und Tracerpartikel, die sich außerhalb dieses Volumens befinden, werden unscharf bzw. nur als schwacher Schatten dargestellt. Bei der Auswertung werden alle Objekte verworfen, die nicht fokussiert dargestellt werden. Dadurch können auch Konturen von Blasen detektiert werden, die sich in

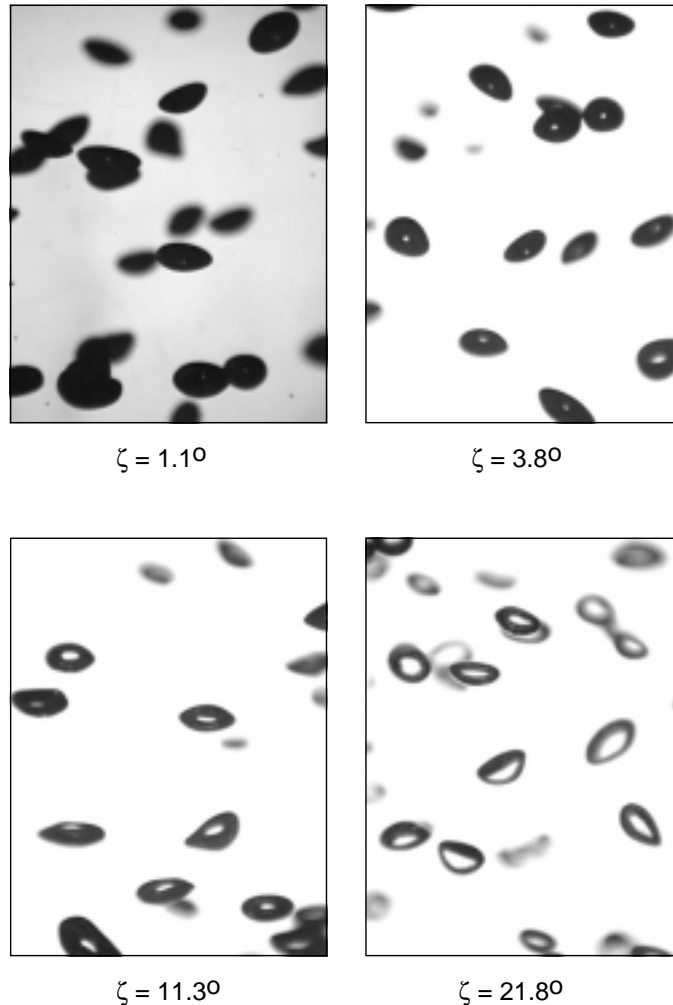


Abb. 1: Aufnahmen einer Blasenströmung bei unterschiedlichen Divergenzwinkeln ζ

der zweidimensionalen Ansicht überlappen. Beispielhaft zeigt Abb. 2 ein Originalbild aus einer Blasenströmung (links) und die erkannten Blasen (rechts). Diese Segmentierung erfolgt für Blasen und Tracerpartikel, die anhand ihrer Größe unterschieden werden. Informationen über die Blasengröße werden direkt aus den Binärbildern durch Bestimmung der Objektflächen gewonnen.

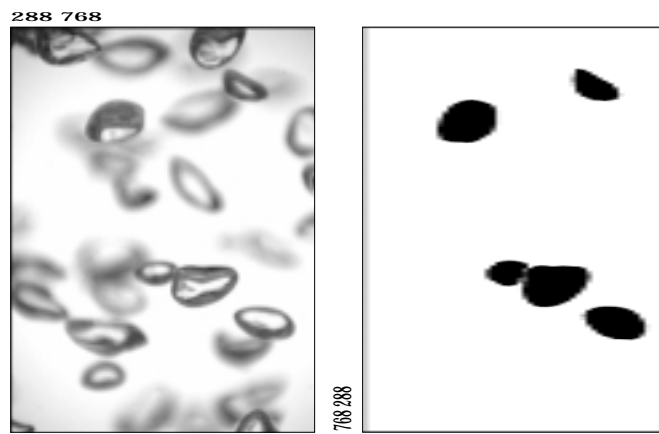


Abb. 2: Grauwertbild einer Blasenströmung (links) und detektierte Blasen (rechts)

2.2 Objektverfolgung

Nach der Detektierung von Blasen und Tracerpartikeln werden die Objekte getrennt voneinander über die Bildsequenz verfolgt. Die Objekte eines Bildes werden jeweils im zeitlich folgenden Bild gesucht. Durch Aneinanderhängen dieser Korrespondenzen entsteht eine Trajektorie der Blasen bzw. Tracerpartikel. Aufgrund der unterschiedlichen Größe von Blasen und Tracerpartikeln unterscheidet sich das Verfahren der Objektverfolgung ('Tracking').

2.2.1 Blasen

Da sich Blasen in praxisrelevanten Zweiphasenströmungen häufig clusterartig ansammeln, ist ein automatisiertes Auffinden von Korrespondenzen bei Verwendung einer herkömmlichen Videokamera (50 Hz Bildaufnahmezeit) nicht möglich. Zwischen aufeinander folgenden Bildern liegt dann ein Zeitraum von 20 ms, in dem sich Blasen mit einer Geschwindigkeit von etwa 50 cm/s um 10 mm bewegen können. Befinden sich mehrere Blasen im Abstand von wenigen Millimetern im Bildausschnitt, ist eine Korrespondenzzuweisung nicht möglich. Bei ausreichend hoher Bildaufnahmezeit überlappen sich korrespondierende Blasen in aufeinander folgenden Bildern, so dass diese Überlappungsfläche als Hauptkriterium für die Identifizierung verwendet werden kann. Je nach Strömung sind hierfür mindestens 300 Hz erforderlich. Zur Identifizierung der Blasen werden im einzelnen folgende Kriterien verwendet:

- Korrespondierende Blasen überlappen sich in den zeitlich folgenden Bildern. Die Überlappungsfläche muss mindestens 30 % der detektierten Blasenfläche betragen.
- Die Projektionsfläche einer Blase kann sich innerhalb des Zeitraums zwischen zwei Aufnahmen nur geringfügig ändern. Hierfür wird eine maximal zulässige Änderung vorgegeben.
- Aufgrund der gefundenen Korrespondenzen wird die Bahn (Trajektorie) der Blase nachgezeichnet. Jede Trajektorie muss aus mindestens drei Punkten bestehen.

Ist eines der drei aufgeführten Kriterien nicht erfüllt, so wird die Korrespondenz verworfen. Die verbleibenden Korrespondenzen ergeben die Trajektorien der einzelnen Blasen mit der momentanen Geschwindigkeit und Größe in jedem Punkt der Bahn.

2.2.2 Tracerpartikel

Im Gegensatz zu Blasen überlappen sich Tracerpartikel aufgrund ihrer kleineren Querschnittsfläche nicht, hier wird als Kriterium zur Objektidentifizierung der kleinste Partikelabstand herangezogen. Auch hier wird die aktuelle Korrespondenz verworfen, wenn eines der folgenden Kriterien nicht erfüllt ist.

- Als mögliche Korrespondenz eines Partikels kommt zunächst das abstandskleinste Partikel im Folgebild der Sequenz in Betracht.
- Die Geschwindigkeit kann sich in dem Zeitintervall zwischen zwei Folgebildern nicht beliebig ändern. Für die maximal zulässige Änderung wird ein Intervall vorgegeben.
- Eine Trajektorie muss aus mindestens drei Punkten bestehen.

3 Verifizierung des Verfahrens

Um die Qualität und Genauigkeit des vorgestellten Zweiphasen-PTV-Verfahrens zu überprüfen, sind vergleichende Messungen mit anderen Messtechniken notwendig. Im Rahmen eines Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft ('Analyse, Modellbildung und Simulation mehrphasiger Strömungen') wurde eine Blasensäule unter definierten Bedingungen von verschiedenen Arbeitsgruppen mit unterschiedlichen Messtechniken untersucht. Die Ergebnisse dieses Ringversuchs wurden zum Vergleich mit dem Tracking-Verfahren herangezogen.

3.1 Experimenteller Aufbau

Die untersuchte Apparatur ist in Abb. 4 (links) dargestellt. Die Wände sind aus Plexiglas gefertigt, die Abmessungen betragen 50 cm in der Höhe, 20 cm in der Breite und 4 cm in der Tiefe. Der Füllstand der Wasser/Luft-Strömung beträgt 45 cm. Bei linksseitiger lokaler Begasung über eine Lochplatte (8 Löcher mit 0.3 mm Durchmesser) stellt sich eine stationäre Strömung mit einem großräumigen Flüssigkeitswirbel ein, der im Uhrzeigersinn umläuft. Die Abtastung der Apparatur mit der Kamera ist auf der rechten Skizze von Abb. 4 zu sehen. Es wurden drei Bildausschnitte mit jeweils 20 cm Seitenlänge aufgenommen, wobei vom obersten Ausschnitt nur die unteren 5 cm ausgewertet wurden. In jedem Bildausschnitt wurden 4 Sequenzen mit je 640 Bildern aufgezeichnet.

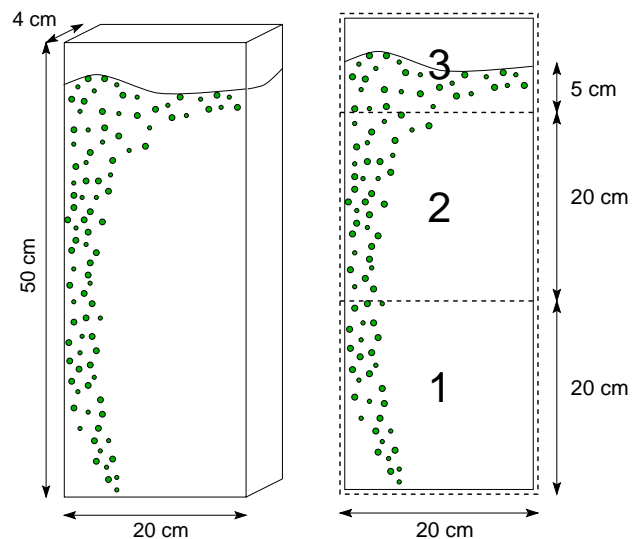


Abb. 4: Abmessungen der Flachapparatur und Abtastung mit der Kamera (links) und Abtastung mit der Kamera (rechts)

Für die in Abschnitt 2 beschriebene Auswertung sind Aufnahmen der Strömung im Durchlicht erforderlich, d. h. das Messvolumen befindet sich zwischen Kamera und Lichtquelle. Der experimentelle Aufbau ist in Abb. 5 skizziert. Zur Beleuchtung wird eine 1000 W starke Halogenlampe eingesetzt, vor die eine Mattscheibe gesetzt wird, um diffuses Licht zu erhalten. Für die Bildaufnahme wird eine Weinberger-Hochgeschwindigkeitskamera verwendet, die bei voller Auflösung (512x512 Pixel) eine Bildaufnahme rate von maximal 1000 Hz erreicht. Blende und Brennweite des Objektivs werden so eingestellt, dass der fokussierte Bereich in der Mitte zwischen Vorder- und Rückwand der Apparatur liegt. Da der Bildausschnitt mit 20x20 cm sehr groß gewählt wurde, werden entsprechend große Tracerpartikel mit Durchmessern von 200 μm der Zweiphasenströmung zugesetzt, um die Flüssigkeitsströmung zu visualisieren.

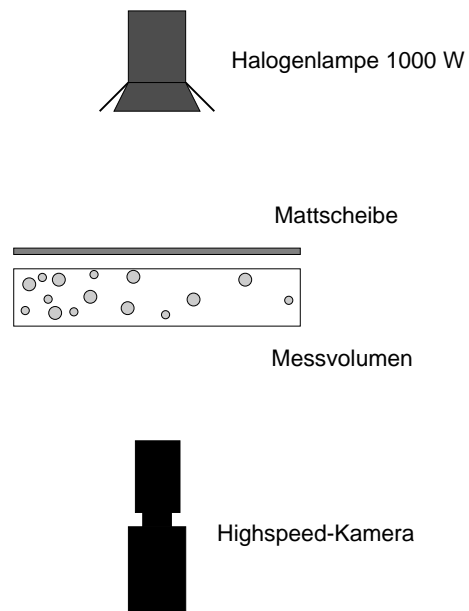


Abb. 5: Bildaufnahme mit der Gegenlichtmethode

3.2 Ergebnisse

In den Bildern der aufgenommenen Sequenzen wurden mit den in Abschnitt 2 beschriebenen Algorithmen Objektdetektierung und -verfolgung automatisiert durchgeführt. Durchschnittlich wurden dabei 315 Tracerpartikel pro Bildausschnitt simultan verfolgt. Die Ergebnisse werden im folgenden für Flüssigphase und Gasphase gezeigt. Detaillierte Vergleichsmessungen aus dem oben beschriebenen Ringversuch liegen nur für die Flüssigkeitsströmung vor.

3.2.1 Flüssigphase

Ein Beispiel für die mittels PTV gewonnenen Ergebnisse zeigt Abb. 6. Hier sind ausgewählte Bahnen einzelner Tracerpartikel, farblich kodiert mit der momentanen zweidimensionalen Geschwindigkeit dargestellt. Dargestellt sind nur solche Trajektorien, die aus mindestens 200 berechneten Korrespondenzen bestehen. In Wandnähe haben die Partikel höhere Geschwindigkeiten, die Korrespondenzzuweisung ist anfälliger. Die erkannten Teilchenbahnen sind daher kürzer und in dem Diagramm nicht eingetragen.

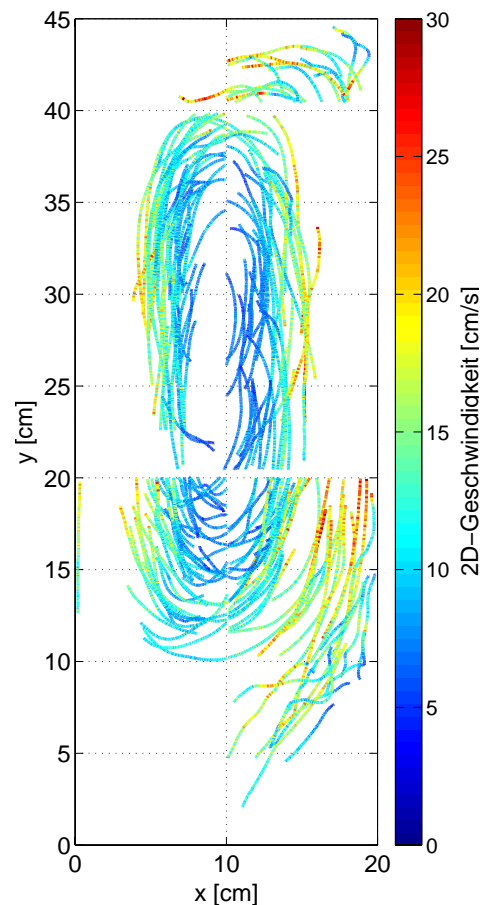


Abb. 6: Trajektorien einzelner Tracerpartikel, farblich kodiert mit der Geschwindigkeit

Ein Vergleich der Messwerte aus Zweiphasen-PTV und anderen Messtechniken ist nur nach Mittelung der Ergebnisse sinnvoll. Um ein Flow-map der Flüssigkeitsgeschwindigkeiten zu erhalten, wird ein Gitter über die ausgewerteten Bildausschnitte gelegt und in jedem Gitterfenster über die gemessenen Werte gemittelt. Diese momentanen Flow-maps werden dann über alle Bilder der Sequenzen in einem Ausschnitt zeitlich gemittelt. Den resultierenden Vektorplot mit einer Auflösung von 16x36 Fenstern zeigt Abb. 7 (links). Die Auflösung kann feiner gewählt werden, wenn eine ausreichend große Anzahl von Geschwindigkeitswerten in jedem Fenster gemessen wurde, also entsprechend lange Sequenzen vorliegen.

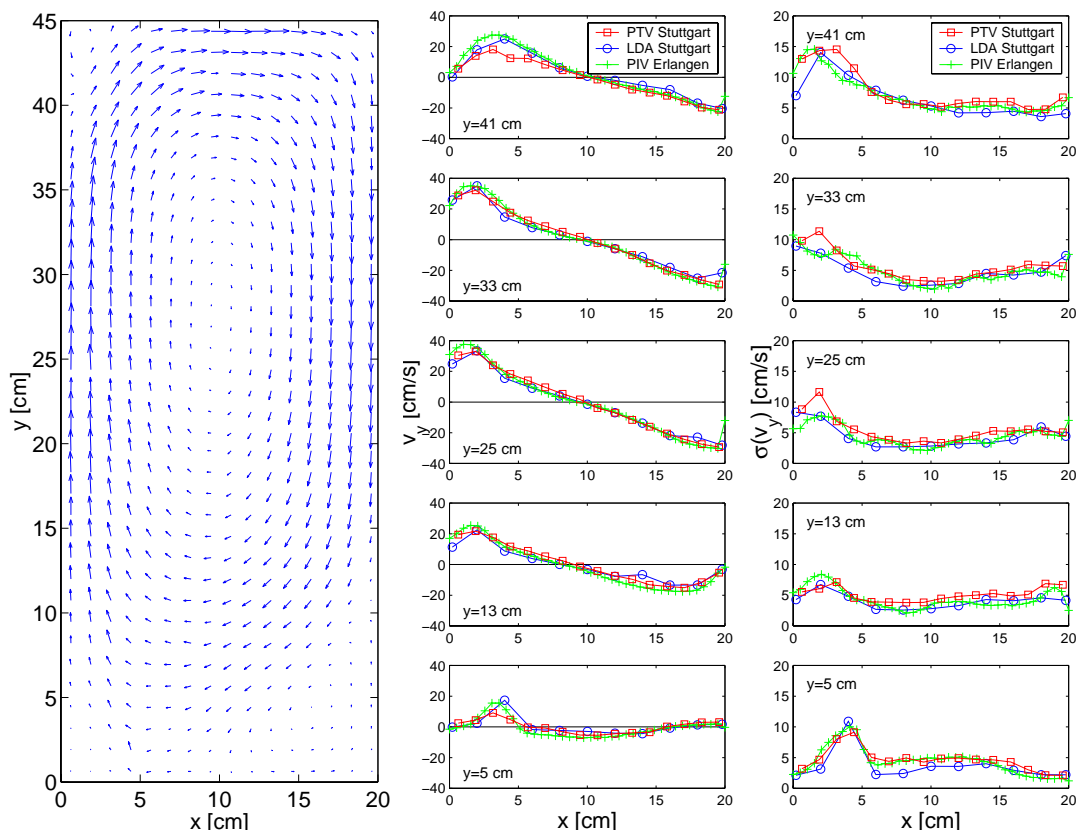


Abb. 7: Flow-map der Flüssigkeitsgeschwindigkeit (links), Vergleich verschiedener Messtechniken für die Geschwindigkeit (Mitte) und für die Standardabweichung (rechts)

Für einen quantitativen Vergleich wurden die vertikalen Geschwindigkeiten in verschiedenen Höhen als Profile in Abb. 7 (Mitte) dargestellt. Neben den PTV-Messungen sind Ergebnisse eingezeichnet, die mit Laser Doppler Anemometrie (LDA) bzw. Particle Image Velocimetry (PIV) [4] gewonnen wurden. Die drei Kurven stimmen in allen Höhen gut überein, es ist keine systematische Abweichung der PTV-Messungen von den beiden anderen Messverfahren zu erkennen. Lediglich auf der Höhe 41 cm liefert das PTV-Verfahren im linken Bereich kleinere Geschwindigkeiten als LDA und PIV. Dies ist damit zu erklären, dass bei dem großen Bildausschnitt (20x20 cm) die Schärfentiefe im Bereich von 2 cm lag und alle Tracerpartikel in diesem Tiefenintervall gemessen wurden. Bei LDA und PIV beträgt dieses Intervall weniger als 1 mm. Da im oberen Bereich der Apparatur die Flüssigkeit an der Vorder- und Rückwand nach unten strömt, ergibt sich beim Zweiphasen-PTV eine kleinere mittlere Geschwindigkeit als bei LDA und PIV.

Zur Untersuchung von Turbulenzeffekten werden die Geschwindigkeitsschwankungen ausge-

wertet. In Abb. 7 (rechts) sind die Standardabweichungen der vertikalen Geschwindigkeit für alle drei Messverfahren aufgetragen. Auch hier sind Abweichungen zwischen den Kurven im Rahmen der Messgenauigkeit.

3.2.2 Gasphase

Für die Gasphase liegen keine detaillierten Vergleichswerte anderer Messtechniken vor. In Abb. 8 sind die Blasengeschwindigkeiten zusammen mit Ergebnissen für die Flüssigphase aufgetragen. Das linke Diagramm zeigt das Flow-map der Blasengeschwindigkeiten. Messwerte liegen nur für den Bereich vor, in dem die Blasen aufsteigen, also für den linken Teil der Apparatur. In Abb. 8 (Mitte) sind die vertikalen Geschwindigkeiten beider Phasen dargestellt. Die Kurve der Gasphase liegt deutlich über der Kurve der Flüssigphase, hat aber einen ähnlichen Verlauf. Die eingezeichnete Schlupfgeschwindigkeit, also die Differenz zwischen vertikaler Blasen- und Flüssigkeitgeschwindigkeit ist daher nahezu konstant. Auch auf verschiedenen Höhen der Apparatur ändert sich die Schlupfgeschwindigkeit kaum. Lediglich in 5 cm Höhe, also über dem Begaser hat sie einen etwas niedrigeren Wert.

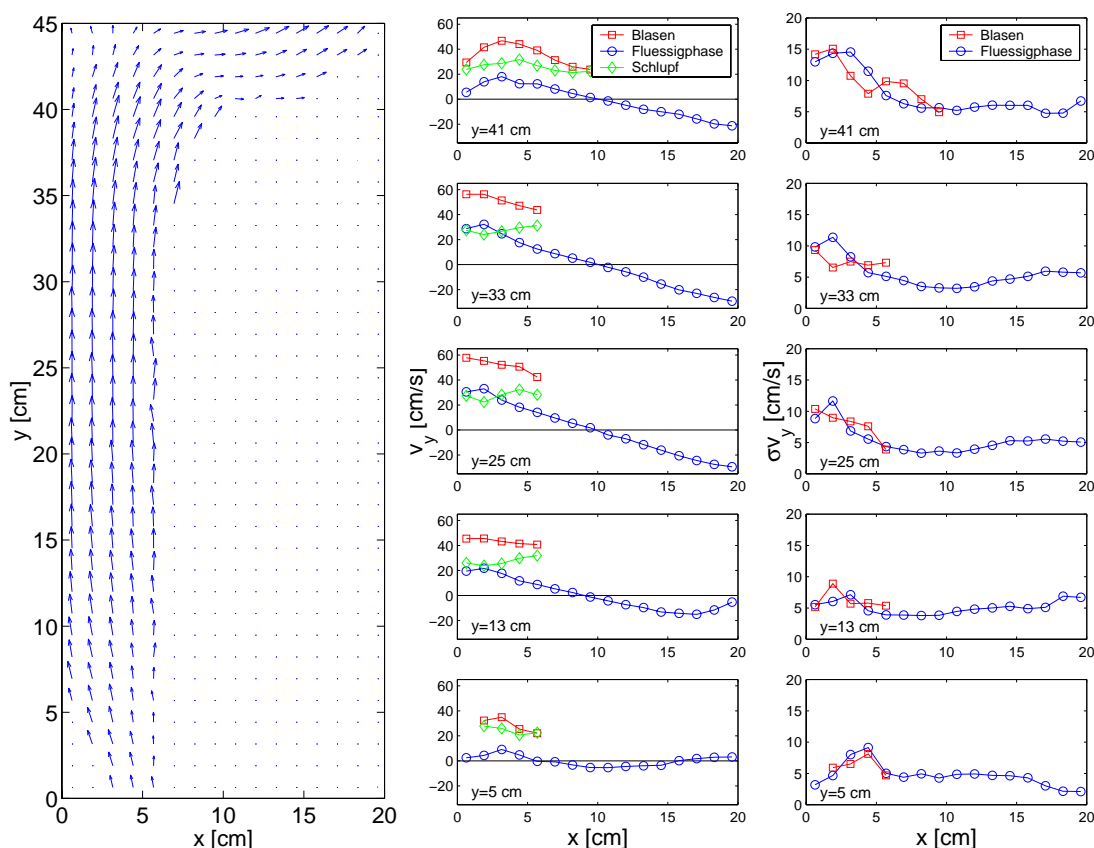


Abb.8: Flow-map der Blasengeschwindigkeit (links), Profile der vertikalen Gas- und Flüssigkeitgeschwindigkeit sowie der Relativgeschwindigkeit (Mitte) und Standardabweichung der Vertikalgeschwindigkeiten (rechts)

Der Vergleich der Standardabweichungen der Vertikalgeschwindigkeit von Blasen und Flüssigkeit zeigt, dass beide in einem ähnlichen Bereich liegen (siehe Abb. 8, rechts). Die Kurve der Gasphase sieht weniger glatt aus als die der Flüssigphase, was damit zu erklären ist, dass für die Gasphase deutlich weniger Messwerte vorliegen, da in den Bildsequenzen weniger Blasen verfolgt wurden als Tracerpartikel.

4 Zusammenfassung

Das vorgestellte PTV-Verfahren ermöglicht eine simultane Erfassung von Blasen und Flüssigkeit in einer Zweiphasenströmung. Trajektorie, momentane Geschwindigkeit und Größe von Blasen und Tracerpartikeln werden orts- und zeitaufgelöst ermittelt. Mit der vorhandenen Hochgeschwindigkeitskamera liegt die Zeitauflösung bei maximal 1000 Hz. Die Auswertung erfolgt automatisiert für jeweils eine aufgenommene Bildsequenz. Das Messverfahren wurde in einer Blasenströmung angewandt und mit anderen Messverfahren erfolgreich verglichen.

Literatur

- [1] Adrian, R. J. (1991) Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics. *A. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, 261-304.
- [2] Borchers, O. (1997) Bestimmung von Größe und Geschwindigkeit der dispersen Phase in Gas-Flüssig-Strömungen mittels digitaler Bildverarbeitung. *Diplomarbeit, Universität Heidelberg*.
- [3] Groen, J. S., Mudde, R. F., van den Akker, H. E. A. (1999) On the application of LDA to bubbly flow in the wobbling regime. *Experiments in Fluids*, Vol. 27, 435-449.
- [4] Brenn, G., Braeske, H. (1997) Experimentelle Grundlagenuntersuchungen zur Strömungsmechanik in Blasensäulen. *Arbeitsbericht zum Schwerpunktprojekt „Analyse, Modellbildung und Berechnung von mehrphasigen Strömungen“*, Projekt Do 251/7-1.
- [5] Lindken R., Gui L., Merzkirch W. (1997) Phase-separated PIV measurements of the flow around systems of bubbles rising in water. *Proceedings of the 1997 ASME Fluids Summer Meeting, FEDSM 97-3103, Vancouver, USA*.
- [6] Martin, W. W., Adbelmessih, A. H., Liska, J. J., Durst, F. (1981) Characteristics of laser-doppler signals from bubbles. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 7, 439-460.
- [7] Tassin, A. L., Nikitopoulos, D. E. (1995) Non-intrusive measurements of bubble size and velocity. *Experiments in Fluids*, Vol. 19, 121-132.
- [8] Yu, P. Y. W., Varty, R. L. (1988) Laser-Doppler measurement of the velocity and diameter of bubbles using the triple-peak technology. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 14, 765-776.