

Phasenaufgelöste Strömungsgeschwindigkeitsprofilmessungen in Grenzschichten an ansteigenden Luftblasen

phase resolved flow velocity profile measurement in shear layers at rising air bubbles

M. Bermuske¹, L. Büttner¹, J. Czarske¹, S. Heitkam²

¹ TU Dresden, Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik,
Fakultät Elektrotechnik Informationstechnik, Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden
E-Mail: Mike.Bermuske@tu-dresden.de, Internet: <http://www.tu-dresden.de/et/mst>

² Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden

Laser-Doppler-Anemometrie, Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor, Blasenströmung
Laser Doppler Velocimetry, Laser Doppler Velocity Profile Sensor, Bubble Flow

Kurzfassung

Flüssige Schäume treten in zahlreichen industriellen Prozessen auf. In einigen sind sie erwünscht, oder sogar essenzielle Grundlage des Prozesses, in anderen Fällen führen flüssige Schäume zu Effizienzeinbußen und Betriebsstörungen. Mittels neuer Simulationsmodelle für Schäume kann dieses Verhalten besser vorhergesagt und dem entgegen gewirkt werden. Basierend auf dem Laser-Doppler-Geschwindigkeits-Profilsensor werden Strömungsmessungen in engen Grenzschichten im Umfeld von Gasblasen vorgestellt, die an einer geneigten Ebene aufsteigen. Es wird ein Messstand vorgestellt, der die Untersuchung der Grenzschichtströmungen in der Nähe von aufsteigenden Luft-Blasen in Wasser ermöglicht. Als geeignetes Messsystem um die geforderten Daten zu gewinnen, wird der Profilsensor mit einer angepassten Auswertung zur Detektion der Blasengrenzschichten gezeigt.

Über die technischen Herausforderungen bei der Erzeugung und der Messung einer Blasenströmung berichtet, speziell in Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen. Das vorgestellte Sensorsystem ist in der Lage die, zum besseren Verständnis der Strömungsbedingungen an Blasen, benötigten Daten zu liefern, um neue Simulationsmodelle für Schaumprozesse validieren zu können.

Einleitung

Flüssige Schäume bestehen aus Gasblasen, die durch einen dünnen Flüssigkeitsfilm voneinander getrennt sind. Das Fließverhalten von Schäumen ist bisher nicht vollständig verstanden. Beispielsweise sind die Mechanismen, die zwischen Wänden und fließenden Schäumen zu Energiedissipation führen nicht vollständig geklärt.

Dazu bedarf es unter anderem der exakten Vermessung der Geschwindigkeitsprofile zwischen Wänden und bewegten Blasen (Saugey, Drenckhan, und Weaire 2006). Da der Abstand zwischen Blase und Wand z.T. deutlich unter 50 µm beträgt, werden allerdings Messungen mit hoher Ortsauflösung benötigt, um diese Daten zu generieren. Die

Ortsauflösung konventioneller Laser-Doppler-Anemometer und Particle-Image-Velocimetry-Systeme ist dafür jedoch unzureichend.

Der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor, der auf der Verwendung zweier fächerförmiger Streifensysteme basiert, erlaubt eine Positionsbestimmung von Partikeln innerhalb des Messvolumens und erhöht so die erreichbare Ortsauflösung signifikant bis in den Mikrometerbereich ((König et al. 2011) und (Shirai et al. 2006)). Er ist in der Lage, in dünnen Grenzschichten zu messen und so die kleinskaligen Effekte, die in der Umgebung der Blase auftreten zu untersuchen. Die Strömungsbedingungen und Schergradienten in Schäumen werden an einem vereinfachten Testexperiment untersucht.

Messobjekt Blasenströmung

Bei diesem Testobjekt handelt es sich um Luftblasen in Tensid-gesättigtem Wasser, die separiert und damit einzeln an einer geneigten Ebene aufsteigen.

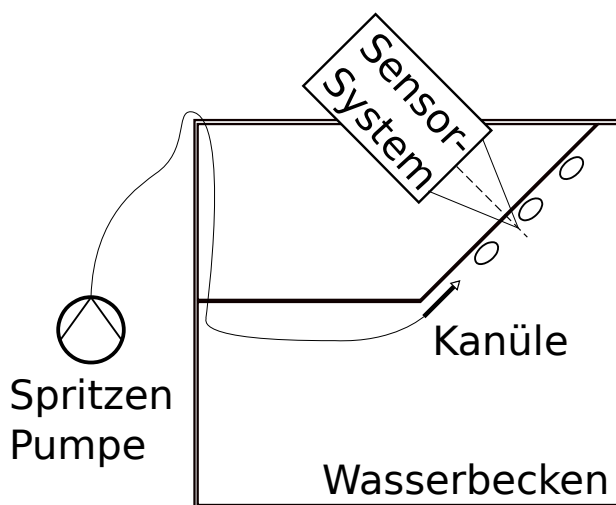


Abbildung 1: Schema Messobjekt



Abbildung 2: Bild des Messobjektes

Die Oberfläche an der die Blasen aufsteigen besteht aus optisch zugänglichem PMMA, das mit einem Neigungswinkel von circa 30° zur horizontalen angeordnet ist. Als Benetzungsmittel im Fluid wurden circa 5 ml handelsübliches „Fit“ Spülmittel auf 6 l Wasser verwendet. Die Blasen werden kontinuierlich erzeugt, um eine Ensemblemittelung durchführen zu können. In der vorliegenden Konfiguration bildeten sich an der Wasseroberfläche, kristallin angeordnete Cluster mit einer Größe von circa 30 Blasendurchmessern. Die Kristallbildung weist deutlich unter 2 % Polydispersität der Blasen hin. Der mittlere Abstand zwischen den Blasen beträgt circa 2 Blasendurchmesser. Eine optische Vermessung zeigt, dass die Blasen einen Radius von $1,25 \pm 0,1$ mm aufweisen.

Laser Doppler Profilsensor als multi-modales Messsystem

Interessant ist hierbei vor allem in Hinsicht der Energiedissipation der Blasenbewegung die Strömung des Fluids in dem Grenzbereich zwischen der Blase und der Wand an der die Blase aufsteigt. Um dieses Strömungsfeld zu vermessen ist ein Sensor notwendig, der die Strömungsgeschwindigkeiten in Richtung der Blasenbewegung in den Grenzschichtbereichen zwischen Blase und Wand messen kann und das phasenaufgelöst auf die Blasenbewegung. Das vorliegende Messobjekt bietet einen optischen Zugang von

oben durch die geneigte PMMA Platte und grundsätzlich auch durch die Seite. Durch den geringen Abstand der Blasengrenzschichten zur Wand von circa 200 µm und dem großen nötigen Arbeitsabstand bei seitlicher Detektion können nur Messsysteme verwendet werden die mit einem einzigen optischen Zugang auskommen.

Die Standard Technik für Strömungsgeschwindigkeitsmessungen unter diesen Bedingungen ist das Laser-Doppler-Anemometer, bei dem zwei, sich kreuzende kohärente Laserstrahlen ein Interferenzstreifensystem mit parallelen Streifen erzeugen (Durst et al. 1977). Ein mit der Strömung mitgeführtes Seeding-Partikel folgt der Strömung und durchquert das Messvolumen, dabei wird ein Streulichtsignal erzeugt, das eine zur Strömungsgeschwindigkeit proportionale Dopplerfrequenz aufweist. Diese grundlegende Technik zur Strömungsgeschwindigkeitsmessung bietet aufgrund des für die Anwendung zu großen Messvolumens (ca. 100x100x1000 µm), aber auch keine ausreichende Ortsauflösung um die Energiedissipation in den Grenzschichten zu untersuchen. Für kleine Messvolumina ergibt sich der Streifenabstand entlang der optischen Achse zu:

$$d(z) = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \cdot \left[1 + \frac{z \cos^2 \theta (z \cos^2 \theta - z_w)}{z_R^2 \cos^2 \theta - z_w (z \cos^2 \theta - z_w)} \right]$$

wobei z die axiale Position ist, λ die Laserwellenlänge, θ der Kreuzungswinkel der Laserstrahlen z_w die axiale Position der Strahltaillie und z_R die Rayleigh Länge.

Für kleine Messvolumina sinkt die Rayleighlänge, sodass der zweite Teil der Gleichung dominiert und die Streifen nicht länger als parallel angenommen werden können.

Diese Gleichung zeigt eine Abhängigkeit des Anstiegs des Streifenabstandes von der axialen Position der Strahltaillien z_w . Abhängig vom gewählten optischen Aufbau können geringfügige Dejustagen der Fokussensysteme einen Drift der Strahltaillienposition hervorrufen, welcher sich direkt in einer Änderung des Streifenabstandes entlang der optischen Achse auswirkt. Mit einem kleineren Fokussdurchmesser kann so zwar eine höhere Ortsauflösung realisiert werden, jedoch nur bei gleichzeitiger Erhöhung der systematischen Unsicherheit der Geschwindigkeitsmessung und umgekehrt.

Jedoch kann dieser Effekt auch genutzt werden um sowohl die Orts- also auch die Geschwindigkeitsunsicherheit zu verringern, indem zwei unterschiedlich defokussierte Streifensysteme kombiniert werden, wie in Abbildung 3 Zu sehen.



Abbildung 3: Streifensystem

Durch die Nutzung dieses Verhaltens wird das Standard LDA zum Laser-Doppler-Profilsensor erweitert (Czarske et al. 2002). Die beiden Fächerförmigen Streifensysteme erzeugen zwei Streulichtsignale für jedes Partikel, dass sich durch sie hindurch bewegt. Der Quotient $q(z) = \frac{f_1}{f_2} = \frac{d_2}{d_1}$ der beiden Doppler-Frequenzen f_1 und f_2 ist dabei eindeutig der axialen Position z der Durchquerung auf der optischen Achse zuordenbar. Diese Zuordnung

erfolgt über die Kalibrierung des Quotienten der Streifenabstände wie in Abbildung 4 ersichtlich.

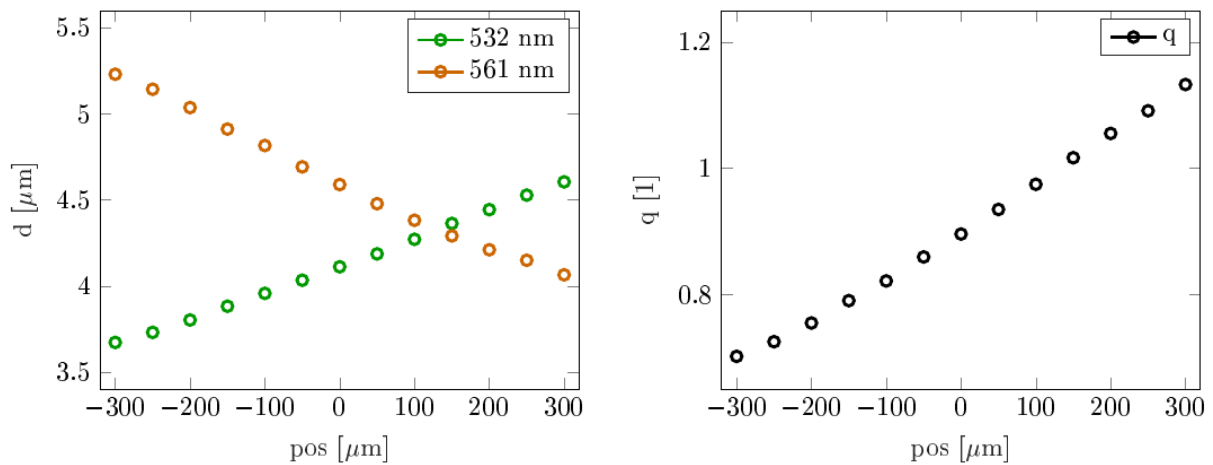


Abbildung 4: Kalibrierung

Die erhaltene Ortsinformation wird genutzt um den Streifenabstand an der jeweiligen Position zu bestimmen und damit die Geschwindigkeitsunsicherheit zu reduzieren. Durch die Ausnutzung dieser Eigenschaften, kann die Komplementarität von Orts- und Geschwindigkeitsauflösung überwunden werden. Die zufällige Orts-Unsicherheit kann auf 0.85 % reduziert werden, bei gleichzeitiger Geschwindigkeitsunsicherheit unter 0.18 % wie gezeigt in König et al. 2010.

Zusätzlich zur Verwendung des Profilsensors zur reinen Geschwindigkeitsmessung, wird die Beleuchtung zusätzlich für die Detektion der Blasenposition genutzt werden.

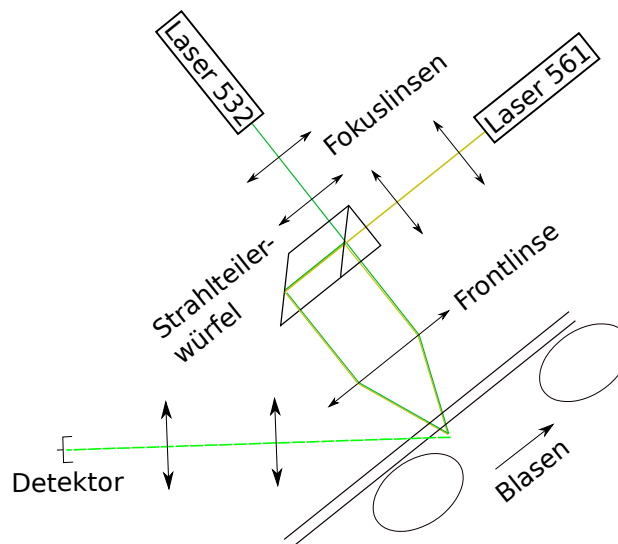


Abbildung 5: Sensorprinzip

Da die Grenzflächen der aufsteigenden Blasen verglichen mit den mitgeführten Partikeln deutlich mehr Licht reflektieren, kann dieses Signal zur Bestimmung der Blasenposition relativ zu den Messwerten der Strömungsgeschwindigkeit genutzt werden. Ein Peak an der Hinterkante wird vom direkten Reflex des einfallenden Laserlichtes auf die Blasengrenzfläche erzeugt. Wohingegen der Reflex an der Vorderkante in die Blase eindringt, an der Rückseite total-reflektiert wird und dann wieder austritt und auf die Detektionsoptik trifft (Siehe Abbildung 5). Über die Amplitude des Signals kann aufgrund der

Pegeldifferenz von Kantenreflexen und Streulichtsignalen zwischen den Ursachen des Signals unterschieden werden und damit eine multimodale Signalverarbeitung realisiert werden, die die Position und Größe der Blasen bestimmen kann und simultan über den gleichen Kanal das Strömungsgeschwindigkeitsprofil erfasst.

Resultate

Zur Charakterisierung des Messobjektes wurden circa 10000 Einzelblasen gemessen und sowohl Größe als auch Abstand zwischen zwei Blasen mit dem multimodalen Ansatz vermessen. Die gemessenen Daten sind in zwei Histogrammen in Abbildung 6 dargestellt.

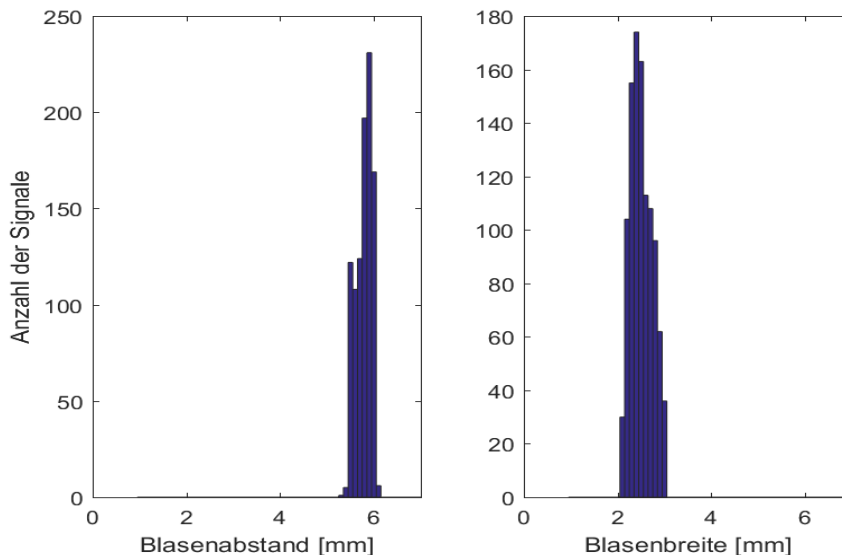


Abbildung 6: Histogramme der Grenzflächendetektion

Mittlerer Blasenabstand beträgt 7 mm mit einer Streuung von 9 % und die mittlerer Größe beträgt 2,5 mm mit einer Streuung von 25 %. Damit lässt sich zeigen, dass das Streulichtsignal des Profilsensors mit einer geeigneten Auswertung auch genutzt werden kann um Grenzflächen zu detektieren, die sich durch das Messvolumen bewegen. Die Totzeit, die entsteht, wenn der Sensor eine Grenzschicht detektiert und aufgrund des starken Signals keine Partikel mehr registrieren kann, beträgt circa 5 % der Transit-Zeit der Blasen durch das Messvolumen. Damit ist das Messsystem während 95 % des Blasentransits in der Lage, Strömungsgeschwindigkeitsdaten zu sammeln. Das konstruierte Messobjekt liefert dabei mit den genannten Parameter hinreichend stabile Bedingungen um die Strömungsgeschwindigkeitsprofile Phasen-aufgelöst auf die Blasenposition messen zu können.

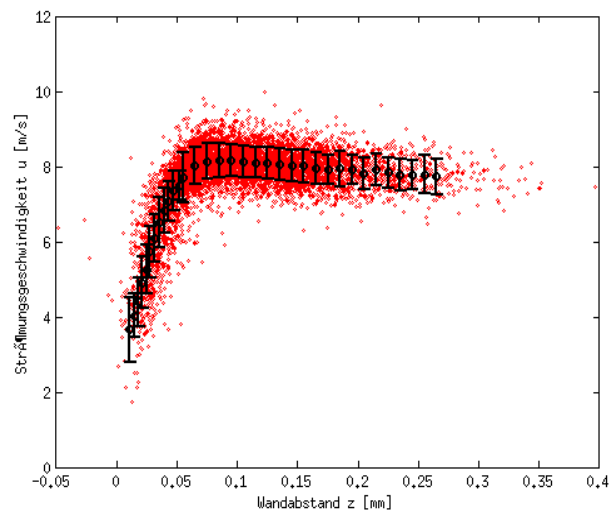


Abbildung 7: Strömungsgeschwindigkeitsprofil

Das in Abbildung 7 dargestellte Strömungsprofil zeigt ein exemplarisches Grenzschichtprofil, wie es mit dem Laser Doppler Profilsensor gemessen wurde und zeigt damit die Eignung des Sensors für dieses Szenario.

Dankesworte

Dank an die Deutsche Forschungsgemeinschaft für die Förderung im Rahmen des Transfer-Projektes (DFG-BU2241/4-1) und an die Max Buchner Stiftung Für die Förderung im Rahmen von DECHEMA (MBFSt-3534).

Literatur

- Czarske, J., Büttner, L., Razik, T., Müller, H.,** 2002. "Boundary Layer Velocity Measurements by a Laser Doppler Profile Sensor with Micrometre Spatial Resolution." *Measurement Science and Technology* 13 (12). IOP Publishing: 1979–89. doi:10.1088/0957-0233/13/12/324.
- Durst, F., Melling, A., Whitelaw, J.H., Wang, C.P.,** 1977. "Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry." *Journal of Applied Mechanics*. doi:10.1115/1.3424128.
- König, J., Mühlhoff, S., Eckert, K., Büttner, L., Odenbach, S., Czarske, J.,** 2011. "Velocity Measurements inside the Concentration Boundary Layer during Copper-Magneto-Electrolysis Using a Novel Laser Doppler Profile Sensor." *Electrochimica Acta*. doi:10.1016/j.electacta.2011.04.034.
- König, J., Voigt, A., Büttner, L., Czarske, J.,** 2010. "Precise Micro Flow Rate Measurements by a Laser Doppler Velocity Profile Sensor with Time Division Multiplexing." *Measurement Science and Technology* 21 (7). IOP Publishing: 74005. doi:10.1088/0957-0233/21/7/074005.
- Saughey, A., Drenckhan, W., Weaire, D.,** 2006. "Wall Slip of Bubbles in Foams." *Physics of Fluids* 18 (5). AIP Publishing: 53101. doi:10.1063/1.2196912.
- Shirai, K, Pfister, T., Büttner, L., Czarske, J., Müller, H., Becker, S., Lienhart, H., Durst, F.,** 2006. "Highly Spatially Resolved Velocity Measurements of a Turbulent Channel Flow by a Fiber-Optic Heterodyne Laser-Doppler Velocity-Profile Sensor." doi:10.1007/s00348-005-0088-3.