

Charakterisierung von Blasen und deren Nachlauf in turbulenter Grundströmung

Characterization of bubbles and their wake in turbulent flows

K. Haase, D. Baczyzmalski, C. Cierpka und C.J. Kähler

Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

Blasenströmung, Stofftransport, APTV, Turbulenzerzeugung, Schattenverfahren
bubbly flows, mass transport, APTV, turbulence generation, shadowgraphie

Zusammenfassung

Mit einem berührungslos arbeitenden 3D-Messverfahren wird das Aufstiegsverhalten, die Pfadoszillation und der Nachlauf von einzeln aufsteigenden und im Gegenstrom festgehaltenen Blasen untersucht. Dazu wurde ein Versuchstand konstruiert, in dem es möglich ist einzelne Blasen und Blasenschwärme zu erzeugen und zu vermessen. Dieser wird im Rahmen des vorliegenden Beitrags charakterisiert und die Blasenbewegungen im ruhenden und gegenströmenden System untersucht. Zur Strömungs- und Blasencharakterisierung wird dazu das Schattenverfahren in Kombination mit 2D-PIV Technik verwendet.

Einleitung

Stofftransportprozesse an Einzelblasen und in Blasenschwärmen bei Gaskonzentrationen, wie sie in industriellen Reaktoren auftreten, sind bis heute noch nicht genau verstanden und eine experimentelle Analyse ist nur schwer durchzuführen. Das Problem besteht darin, dass sich der Stofftransport über die Phasengrenze hinweg in die Strömungsgrenzschicht erstreckt und Stoffe sich im Nachlauf der Blase sammeln. Die Stoffanreicherung in der Strömungsgrenzschicht an der Blasenoberfläche ist dabei auf wenige Mikrometer begrenzt und kann mit etablierten Messmethoden nicht aufgelöst werden (Schlüter (2011), Tropea et al. (2007)). Da keine verlässlichen Daten vorliegen, können auch die mathematischen Transportmodelle nicht verifiziert werden und sind daher mit hohen Unsicherheiten behaftet. Folglich sind auch die numerischen Strömungssimulationen, die auf diesen Modellen beruhen, ungenau in ihren Vorhersagen (Sommerfeld (2004), Bothe et al. (2013)). Auch die Anreicherung der Stoffe im Nachlauf der Blasen kann experimentell nur sehr schwer, bzw. mit schlechter räumlicher Auflösung erfasst werden, da für die Bestimmung der Stoffkonzentration nur Sonden oder Lichtschnittverfahren, basierend auf molekularen Tracern (LIF), zur Verfügung stehen. Der Stofftransport wird durch das Oberflächen- zu Volumenverhältnis der Blasen und die Turbulenz in der Umgebung der Phasengrenze bestimmt. Da beide Effekte durch die Deformation und Dynamik der Blase beeinflusst werden, sind eine genaue Charakterisierung der Blasengeometrie und deren Bewegung in Abhängigkeit der Turbulenz wichtig. Sonden, die in der Verfahrenstechnik häufig eingesetzt werden, um bei hoher Gasbeladung z.B. den pH-Wert und den Gasanteil oder die

Blasengrößen zu bestimmen, induzieren signifikante Störungen, welche die Turbulenz und den Stofftransport in den Blasenreaktoren beeinflussen und daher zu wenig aussagekräftigen Ergebnissen führen (Prasser et al. (2000), (2007)). Im Hinblick auf die Verifizierung von physikalischen Modellen oder die Validierung von numerischen Simulationstechniken ist die Aussagekraft von Sondenmessungen, bei Blasen mit Durchmessern im einstelligen Millimeterbereich besonders zweifelhaft und wenig hilfreich in der Bewertung der physikalischen Detailprozesse. Hierfür sind lokal aufgelöste Messungen ohne systematische Fehler durch eine räumliche Mittelung und zusätzliche Strömungsbeeinflussung nötig, um z.B. auch den Effekt von Geschwindigkeitsgradienten bewerten zu können, die gerade beim Stofftransport eine wesentliche Rolle spielen. Die Analyse wird weiter erschwert, wenn der Stofftransport der turbulenten Vermischung unterworfen ist, wie sie in Blasenschwärmen oder Blasenreaktoren typischerweise auftreten. In diesem Fall müssen die Transportprozesse in Abhängigkeit von turbulenten Skalen betrachtet werden, was wiederum eine enorme messtechnische Herausforderung darstellt, da systematische Fehler durch die Integration über die Lichtschnittdicke zu Verfälschung bzw. Tiefpassfilterung der Ergebnisse führt und die Verlässlichkeit folglich mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Dies ist insbesondere für Verfahren problematisch, die eine optische Zugänglichkeit von verschiedenen Seiten benötigen, um die Informationen aus den verschiedenen Blickrichtungen miteinander zu verrechnen, wie z.B. bei der tomographischen PIV oder bei klassischen 3D PTV Techniken (Klein et al. (2013), Cierpka et al. (2012)). Im Rahmen des Projektes soll diese Lücke geschlossen werden, indem systematische Experimente in einer an die Fähigkeiten numerischer Simulationswerkzeuge angepassten experimentellen Anlage mit neu entwickelten optischen 3D Messtechniken unter realistischen Bedingungen durchgeführt werden. Das langfristige Ziel besteht darin alle relevanten Daten für eine physikalische Analyse der Prozesse und eine Validierung der numerischen Simulation zu erheben. Zu diesem Zweck wurde ein Teststand aufgebaut, in dem einzelne Blasen oder Blasengruppen in stark turbulenten Strömungen erzeugt und hinsichtlich Aufstiegsverhalten, Pfadoszillation, Deformation sowie Stofftransport im Gegenstrombetrieb untersucht werden können. Im ersten Schritt wird der Versuchstand hinsichtlich des Strömungsverhaltens in der Messstrecke vermessen anschließend das Aufstiegsverhalten einzelner Blasen mit und ohne Gegenströmung untersucht. Diese Charakterisierungen dienen als Grundlage und Referenzdaten für spätere Messungen.

Versuchsaufbau

Strömungskanal

Die Experimente wurden im vertikalen Wasserkanal der Universität der Bundeswehr München durchgeführt. Der Kanal hat eine Höhe von ca. 3 m und ist in Abb. 1 dargestellt. Der Kanal besteht aus einem Edelstahl Wasserbecken mit einer Querschnittsfläche von ca. 400 × 400 mm², in den das Fluid über eine Pumpe weitgehend störungsfrei eingebracht werden kann. Dazu wurde die Messstrecke von der Pumpe vollständig entkoppelt. Um zu gewährleisten, dass keine nennenswerten Oberflächenwellen entstehen, ist am oberen Rand des Wasserbehälters ein Überlauf, der als reflexionsfreier Abschluss dient, installiert. Am unteren Ende des Wasserbeckens befindet sich eine Aufnahme für die verschiedenen Turbulenzerzeuger, die im Rahmen des Projektes betrachtet werden. Zwischen Wasserbecken und Messstrecke, direkt hinter dem Turbulenzgenerator, befindet sich eine Düse, die die Intensität der mittels Turbulenzgenerator erzeugt, absolut verstärkt und das Längenmaß der turbulenten Skalen verringert. Durch die Kontraktion werden künstlich erzeugten Längswirbel in der Düse unter Beibe-

haltung ihres Drehimpulses gestreckt, wobei sich der Wirbel-durchmesser verringert. Daher werden die Schwankungsintensitäten größer und die räumlichen Skalen der Turbulenz kleiner. Um die Verstärkung der Turbulenz möglichst effektiv zu gestalten, wurde für die Beschleunigung der Strömung eine Düse nach dem Börgerverfahren ausgelegt. Die Börgerdüse zeichnet sich durch eine sehr kurze Bauform aus, sodass der Dissipationseffekt minimiert wird und alle Skalen erhalten bleiben und verstärkt werden. Mit einem Abstand von 260 mm sind Fenster in die Messstrecke eingebaut, die ein Einbringen eines Kalibriergitters erlauben oder dazu verwendet werden können Chemikalien in die Messstrecke einzubringen. Die $0,08 \times 0,08 \times 1 \text{ m}^3$

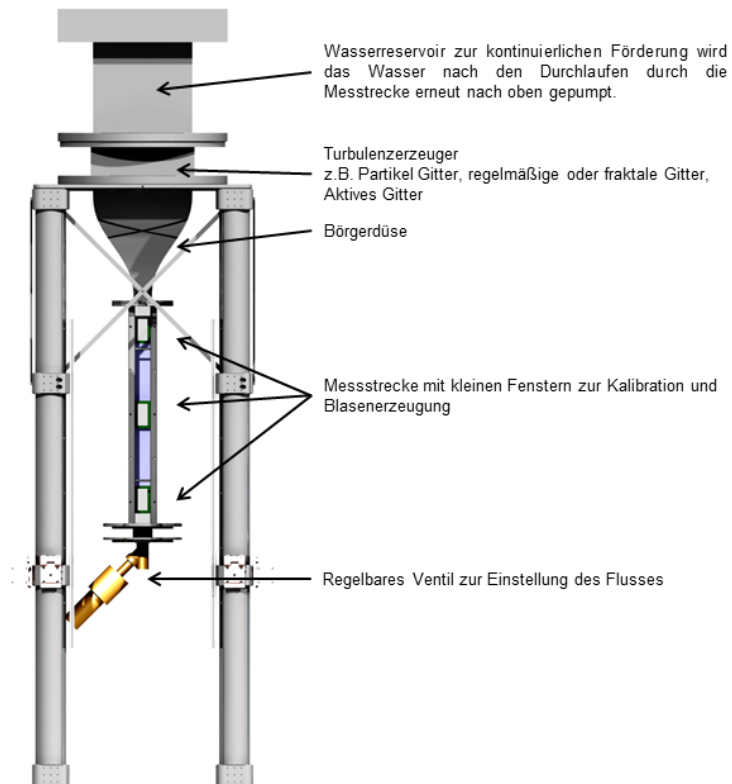


Abb. 1 Gerendertes Bild der gesamten Messstrecke

große Messstrecke bietet optischen Zugang von allen vier Seiten und erlaubt den Einsatz berührungslos arbeitender 3D Messverfahren, wie tomographisches PIV (particle image velocimetry) oder das am Institut entwickelte Astigmatismus PTV (particle tracking velocimetry, Cierpka et al. (2010)). Um auf ein Mitführen des Kamerasystems zu verzichten, kann ein regelbarer Gegenstrom in der Messstrecke erzeugt werden, um die Verweildauer der Blasen im Messvolumen anzupassen. Blasen werden mittels einer Kapillare erzeugt, die über ein Rückschlagventil am untersten Fenster in der Messstrecke eingebaut ist. Von außen liegt 0,5 bar Überdruck an. Durch ein schnell schaltendes Ventil mit einer Verschlusszeit von 2 ms können durch Öffnungszeiten von 230 ms und einer Kapillare mit 1,1 mm Außendurchmesser geeignete Blasen generiert werden. Mit der Verwendung einer anderen Kapillare und Variation der Öffnungszeit des Ventils kann die Blasengröße gewählt werden.

Messtechnik

In diesem Paper werden die Ergebnisse zweier verschiedener Experimente vorgestellt. Die jeweiligen Versuchsanordnungen werden hier beschrieben.

Für die Messung aufsteigender Blasen wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera (Imager HS 4 Pro, LaVision, 2.016x2.016 Auflösung bei 1,3 kHz) mit einem Objektiv (f=50mm, Zeiss) und einem Telekonverter verwendet. Für die Blasenaufnahmen wurde ein Schattenverfahren (Shadowgraphie) verwendet. Dieses bietet den Vorteil, dass Blasen bei geeigneter Ausleuchtung unabhängig von ihrer Tiefenposition dieselbe Größe besitzen. Auch erlaubt dies eine optische Trennung zu anderen Signalen (siehe nachfolgender Abschnitt). Zur gleichmäßigen Ausleuchtung des Messvolumens wurde vor der Mehrkanallichtquelle (Lumencor Spectra X) ein Diffusor im Abstand von 60 cm platziert. Dabei ist darauf zu achten, dass der Diffusor so platziert wird, dass zwischen der Blase und der den Begrenzungen des Diffusors maximal ein Winkel von

12° entsteht, da sonst die Größe der Blase verfälscht wird (Baczyzmalski et al. (2015)). Es wurden mehrere einzelne Blasen und Blasenketten aufgezeichnet.

Um zeitgleich Blasen und das Strömungsfeld mit PIV und Schattenverfahren zu messen, muss das Signal der Tracerpartikel von dem der Blasen getrennt werden. Dies wurde durch den Einsatz verschiedener Wellenlängen und die dazugehörigen Filter vor den Kameras, erreicht. Es wurden zwei Lichtquellen und fluoreszierende Partikel (Rhodamin B) verwendet. Das grüne Laserlicht ($\lambda_{PIV} = 532 \text{ nm}$) regt die Partikel an, welche ein Fluoreszenzsignal mit einer mittleren Wellenlänge von $\lambda_{Tracer} = 570 \text{ nm}$ emittieren. Für das Schattenverfahren wurde blaues Licht im Wellenlängenbereich $\lambda_{Blasen} = 420\text{--}450 \text{ nm}$ einer Mehrkanallichtquelle und ein Diffusor eingesetzt. Das grüne Laserlicht wird komplett von den Filtern abgeschirmt, da sowohl die Blasen selbst, als auch die Partikel dieses Licht reflektieren und bei einem direkten Laserreflex die Kameras zerstören würden. In der Aufnahme der Kamera mit Orangefilter sind nur die Partikelbilder zu sehen. Die andere Kamera hingegen bildet nur das Schattenbild der Blasen ab. Damit können zwei getrennte Bilder, störungsfrei und mit hoher Auflösung aufgenommen werden.

Eine schematische Zeichnung des Aufbaus ist in Abb. 2 gezeigt. Die optische Trennung der Signale wird mit einem polarisationsabhängigem Strahlteiler sowie einem Langpass- und einem Kurzpassfilter durchgeführt. Der Strahlteiler ist im 45° Winkel zwischen den Kameras aufgebaut damit beide Kameras ohne Verzeichnungen das gleiche Messfeld beobachten können. Vor einer Kamera ist der Langpassfilter montiert, der Wellenlängen oberhalb 570 nm passieren lässt und damit nur das Fluoreszenzsignal der Partikelbilder passieren lässt. An der zweiten Kamera ist ein Kurzpassfilter angebracht, der nur Wellenlängen unterhalb 450 nm transmittieren lässt, womit die Schattenbilder der Blasen aufgezeichnet werden können.

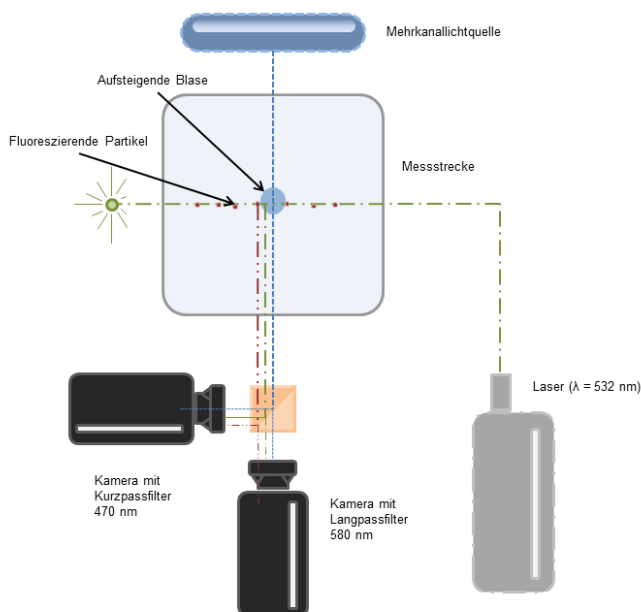


Abb. 2 Nicht maßstabsgetreue Skizze des Messaufbaus. Schattenbild der Blase und PIV Partikelbilder werden mittels Licht unterschiedlicher Wellenlänge getrennt. Das grüne Laserlicht regt die Fluoreszenz der Rhodamin B Partikel an und eine blaue Hintergrundbeleuchtung erzeugt das Schattenbild der Blase. Vor der auf dem Bild linken Kamera befindet sich ein 450 nm Kurzpassfilter. Die untere Kamera beobachtet durch einen 570 nm Langpassfilter nur die Fluoreszenz der Partikel.

Um eine Überbelichtung der Kameras zu verhindern, zeichnet die Kamera für die Blasenbilder Einzelbilder mit Belichtungszeiten von 1000 ms auf. Die PIV Kamera nimmt Doppelbilder auf, wobei, aufgrund der langen Belichtungszeit des zweiten Bildes darauf geachtet werden muss, dass die Hintergrundbeleuchtung der Blasen nicht zu stark ist, da der Langpassfilter noch einen Anteil des blauen Lichtes passieren lässt. Es wurden zwei sCMOS Kameras (LaVision) mit Objektiven von Zeiss ($f=50\text{mm}$) verwendet.

Bildverarbeitung

Die Schattenbilder wurden mit Hilfe einer zuvor erstellten Kalibrierfunktion entzerrt, um eine Überlappung der Schatten- und PIV Bilder zu gewährleisten. Die Kalibrierfunktion wurde aus Bildern eines Gittermusters mit bekanntem Gitterabstand berechnet (DaVis, LaVision GmbH). Zur Vorbereitung der Bilder wurde vor der Geschwindigkeitsberechnung ein mittleres Hintergrundbild abgezogen, sowie ein ‚Sliding Background‘ Filter angewendet. Um Artefakte durch die Neuberechnung der Rohbilder in den Geschwindigkeitsdaten zu vermeiden, wurde die Entzerrung erst auf die ausgewerteten Vektorfelder angewendet.

Ergebnisse und Diskussion

Frei aufsteigende Blasen in ruhendem Wasser

Zur Charakterisierung der Blasenbewegung in ruhendem Fluid wurden mehrere Einzelblasen und Blasenketten mit 900Hz aufgezeichnet, detektiert und der Massenschwerpunkt verfolgt. An diese Pfade wurde ein Sinus gefittet und hinsichtlich Amplitude und Frequenz ausgewertet. Eine Aufnahme der Blasenketten ist im linken Bild von Abb. 3 beispielhaft gezeigt. Zur Detektion der Blasen wurde das Ursprungsbild in ein Binärbild umgewandelt und die Kontur der Blasen mit Hilfe eines Partikeldetektionsalgorithmus berechnet. Das Ergebnis ist im rechten Bild in Abb. 3 gezeigt. In diesem sind zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufsteigende Blasen gezeigt, um die Deformation der Blasen zu verdeutlichen.

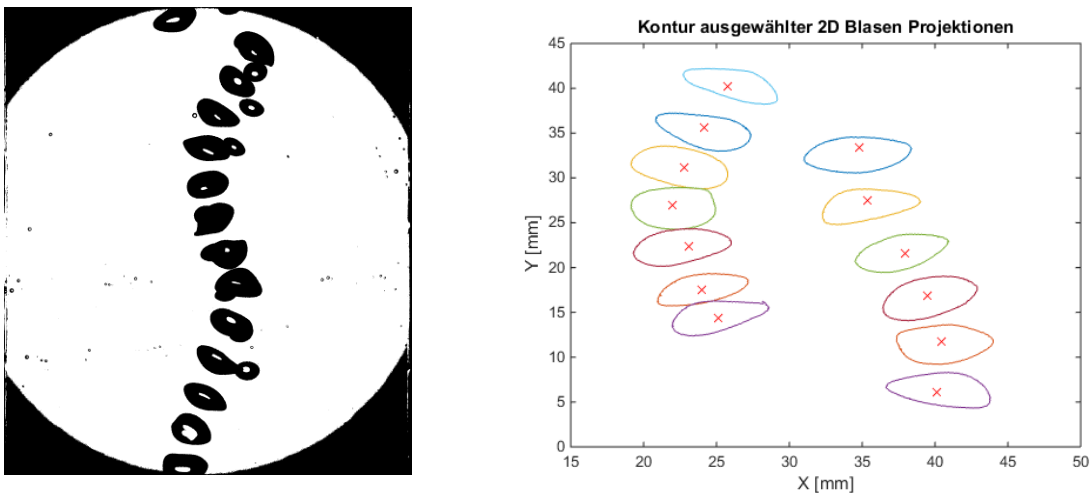


Abb. 3 Linkes Bild: Zeitfolge einer einzelnen aufsteigenden Blase mit einem Zeitabstand von 22 ms zwischen den gezeigten Blasen. Rechtes Bild: Kontur der Blasen und deren Bewegung. Das x markiert den Massenschwerpunkt der gefundenen Blasenbilder. In beiden Bildern haben die Blasen einen durchschnittlichen äquivalenten Durchmesser von ~7mm.

Der mittlere äquivalente Durchmesser der Blasen wurde aus der Schattenfläche des Bildes bestimmt. Dabei wurde ein Kreis derselben Fläche angenommen und der entsprechende Radius berechnet. In Abb. 4 sind die Blasenbewegungen größerer Blasen mit einem mittleren äquivalenten Durchmesser von 7 mm gezeigt.

In bisherigen Veröffentlichungen von Haberman & Morton (1954), Hartunian & Sears (1957), Saffman (1956), Aybers & Tapucu (1969) und Duineveld (1994, 1995) werden die Blasenbewegung und in Aybers & Tapucu (1969), Haberman & Morton (1954), Miksis et al. (1981) Ryskin & Leal (1984), Duineveld (1994, 1995) und Benjamin (1987) sind die Blasenformen hinsichtlich der Blasen-Reynolds-Zahl ($Re_b = 2 \times U_b \times r_b / \nu$) und anderer dimensionsloser Zahlen diskutiert (z.B. Weber-Zahl $We = \rho \times U_b^2 \times r_b / \sigma$). Hierbei sind U_b die Aufstiegs- geschwindigkeit der Blase, r_b der Äquivalentdurchmesser der Blase (Radius einer Kugel mit sel- ben Volumen), ν die kinematische Viskosität, ρ die Dichte und σ die Oberflächenspannung. Der Pfad einer aufsteigenden Blase ist vor allem durch die Reynolds-Zahl der Blase bestimmt. Für Reynolds-Zahlen kleiner 300 steigen die Blasen gerade auf, für $300 < Re_b < 3000$ bewegen sie sich spiralförmig und ab $Re_b > 3000$ in einer ‚zickzack‘ Bewegung. Formoszillationen treten ab einem Radius größer als 1mm auf und sind in Abb. 3 deutlich zu erkennen. Sind die Blasen kleiner, so sind sie elliptisch und bei Radien kleiner als 0,42 mm sphärisch. Die in diesem Versuch erzeugten Blasen besitzen einen Durchmesser von ~7mm. In Aufstiegsrich- tung besitzen die Blasen eine mittlere Geschwindigkeit von $233 \pm 59,2$ mm/s, was gut mit der theo- retisch erwarteten Geschwindigkeit von 232 mm/s übereinstimmt. Die Reynolds-Zahl beträgt damit $Re_b = 4400$, womit eine zickzack-förmig aufsteigende, forminstabile Blase zu erwarten wäre.

Durch den Versuchsaufbau wird die dreidimensionale Bewegung der Blase projiziert, wobei Amplitude und Frequenz der Bewegung weitgehend erhalten bleiben. Da sich gezeigt hat, dass die Trajektorien spiralförmige Blasenpfade widerspiegeln, konnte mittels der Fitfunktion: $y(x) = y_0 \times A \times \sin((x - x_c)/w)$ aus den 20 bestimmten Blasen trajektorien die mittlere Amplitude A und Wellenlänge $2 \times w$ bestimmt werden. Wobei y_0 eine Verschiebung entlang der y-Achse und x_c eine Verschiebung in der x-Achse ist. Daraus wurde eine mittlere Amplitude von $2,87 \pm 1,13$ mm und die Wellenlänge $7,11 \pm 1,88$ mm bestimmt. Die große Schwankung der Amplitude lässt sich aus der großen Schwankung und Deformation der Blase erklären. Was auch in Abb. 3 rechtes Bild zu erkennen ist. Wie aus Beobachtungen des Bla- senpfades hervorgeht, sind im Gegensatz zur Theorie spiralförmige Bewegungen der Blasen zu sehen. Dies lässt sich auf Verunreinigungen im Wasser zurückführen, wie es auch Brücker (1999) schreibt.

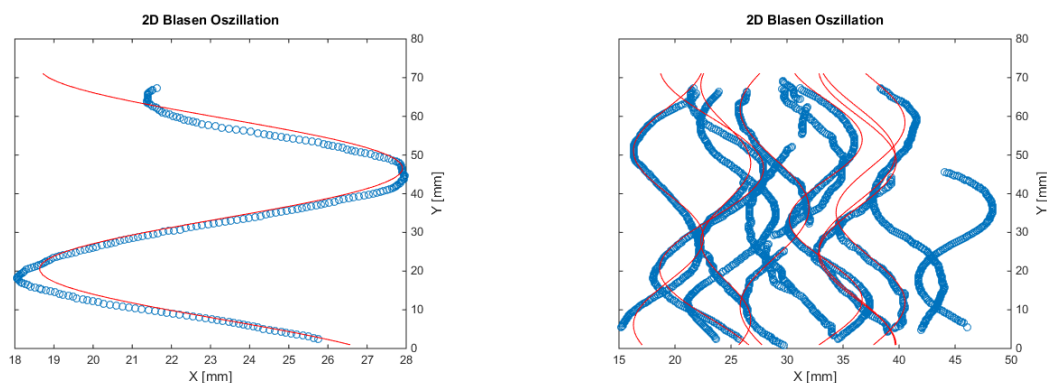


Abb. 4 Bewegung aufsteigender Blasen. Mit blauen Kreisen ist der Schwerpunkt der Blase markiert und in rot ein Fit des Blasenpfades. Im linken Bild sind beispielhaft eine Blase und der dazugehörige Fit ge- zeigt. Das rechte Bild zeigt eine Auswahl an Blasenpfaden und die dazugehörigen Fitfunktionen.

Blasen in Gegenströmung mit kombinierter PIV Messung und Schattenverfahren

Wie in der Einleitung beschrieben, sollen im späteren Verlauf des Projektes die Blasen im Gegenstrom festgehalten werden und hinsichtlich Stofftransport und erzeugter Turbulenz untersucht werden. Für erste vorbereitende Untersuchungen wurde ein „Zwei-Kamera-Setup“ gewählt, wie es im vorangegangenen Abschnitt beschrieben ist. In den Aufnahmen der Blasen im Schattenverfahren ist deutlich ein Intensitätsabfall innerhalb der Blase im invertierten Schattenbild zu erkennen (vgl. auch Abb. 3). Diese Artefakte resultieren aus der Krümmung der Blase und der Beleuchtung. Um den Fehler in der Größenbestimmung zu minimieren wurde das Setup so gewählt, dass dieser helle Bereich minimal wird (Baczyzmalski et al. (2015)). In den PIV Aufnahmen, in denen die Blasen den Lichtschnitt passieren, sind zusätzlich das Streulicht der Blase und die dadurch angeregte Fluoreszenz der Partikel zu erkennen. Auch wird das Laserlicht teilweise gestreut und reflektiert, woraus ein Schatten auf der lichtabgewandten Seite der Blase zu sehen ist. Die hellen Bereiche ober- und unterhalb der Blase lassen sich mit Streueffekten an der Blasenoberfläche erklären. Die Ansammlung der Partikel um die Blase herum, rührt durch die Beschichtung der Rhodamin Partikel mit einem Tensid, die Agglomeration der Partikel verhindert. Dadurch sammeln sich die Partikel an der Oberfläche der Blase vermehrt an.

Die Aufnahme der Doppelbilder erfolgte mit einem Zeitabstand von $\Delta t = 1500 \mu\text{s}$. Die Auswertung wurde mit Interrogationsfenstern von $16 \times 16 \text{ px}$ durchgeführt. Neben den Aufnahmen der Strömung mit Blasen wurde als Referenz auch ein Datensatz für die ungestörte Strömung mit 1000 Doppelbildern aufgezeichnet und ausgewertet. Bei der Charakterisierung der durch die Blase verursachten Strömung musste darauf geachtet werden, dass nur solche Bilder ausgewertet werden, in denen die Blase den Lichtschnitt passiert. In zukünftigen Messungen sollen daher 3D Verfahren verwendet werden, bei denen das Strömungsfeld während des gesamten Blasenanstiegs beobachtet werden kann. In Abb. 5 ist eine solche Auswertung der Strömung um eine Blase gezeigt. Im Hintergrund im oberen Drittel des Bildes ist die Blase gezeigt und im Vordergrund ist die Wirbelstärke farbcodiert aufgetragen. Direkt hinter der Blase ist der Nachlauf anhand der Wirbel deutlich zu erkennen. Im unteren Drittel sind zusätzlich zwei bereits zu einem früheren Zeitpunkt abgelöste Wirbel, bzw. deren Projektion in die Messebene sichtbar. Diese wurden von der Gegenströmung bereits stromab konvektiert.

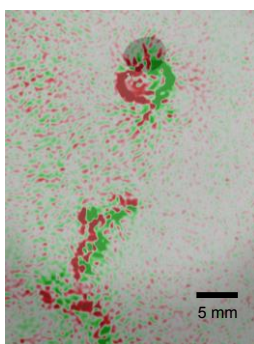


Abb. 5 Im Gegenstrom festgehaltene Blase. Im Hintergrund ist in leichtem grau das Schattenbild der Blase gezeigt und im Vordergrund die Wirbelstärke ausgerechnet aus den PIV Daten.

Für das blasenfreie Strömungsfeld und zwei zufällig ausgewählte Blasen wurden das mittlere Strömungsfeld und die Standardabweichung berechnet. Der Turbulenzgrad lässt sich dabei nach folgender Formel berechnen:

$$(1.1) \quad T_U = \frac{1}{U_\infty} \sqrt{\frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})}$$

In Formel (1.1) bezeichnet U_∞ die Anström- bzw. die Geschwindigkeit des Gegenstromes in der Messstrecke und $\overline{u'^2}$ bzw. $\overline{v'^2}$ die Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponenten in x- bzw. y-Richtung. In Abb. 7 lässt sich so der erhöhte Turbulenzgrad durch den Einfluss der einzelnen Blase deutlich erkennen. Der mittlere Turbulenzgrad steigt gegenüber einer ungestörten Strömung um ca. 1%.

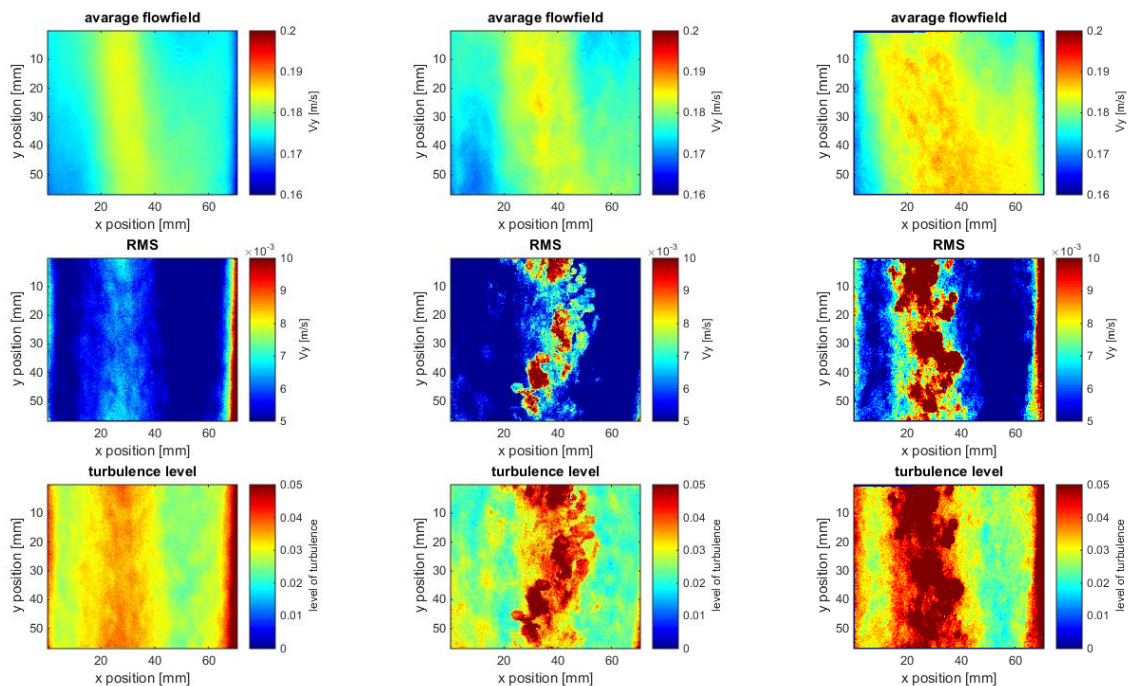


Abb. 6 Vergleich zwischen der ungestörten Strömung (links) und zweier ausgewählter Strömungen mit aufsteigenden Gasblasen (Mitte und rechts). in der mittleren Reihe ist die dazugehörige Standardabweichung gezeigt. Die unterste Reihe zeigt die örtliche Verteilung der Turbulenz berechnet nach Formel (1).

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorgestellten Arbeit war es den vertikalen Strömungskanal hinsichtlich der Grundströmung zu charakterisieren und eine Methodik zu implementieren, die es ermöglicht einzelne frei aufsteigende Blasen oder Blasen im Gegenstrom zu erzeugen und zu charakterisieren. Dazu konnten Ergebnisse von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zur Untersuchung der Pfadoszillation und Formveränderung und einer kombinierten Messmethode zur gleichzeitigen Bestimmung der Blasenform und Position und der umgebenden Strömung gezeigt werden. Die Charakterisierung des Kanals und die Ergebnisse der Blasenuntersuchung stehen in guter Übereinstimmung mit den bereits veröffentlichten Ergebnissen von z.B. Brücker (1999), Haberman & Morton (1954) sowie Duineveld (1995). Im weiteren Projektverlauf sollen anhand dieser Ergebnisse die Messmethode auf die drei-dimensionale Messungen, im Hinblick auf das Strömungsfeld und die Bestimmung der Position der Blase im Raum erweitert werden.

Dankesworte

Dieses Projekt wurde im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms SPP 1740 Projekt KA 1808/18-1 gefördert und durch Mitarbeiter unterstützt, die über die Emmy-Noether Nachwuchsgruppe CI-185/3 von der DFG finanziert werden.

Literatur

- Aybers, N. M., Tapucu, A. 1969: "The motion of gas bubbles rising through stagnant liquid". Wärme- und Stoffübertragung, 2, pp. 118-128
- Baczymalski, D., Haase, K., Kähler, C.J., Cierpka, C. 2015: „Bestimmung der Blasengröße und 3D-Position in Zweiphasenströmungen mittels Defokussierungsmethoden“, Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 08.-10.09.2014, Dresden, Germany
- Bothe M., Schlüter M. 2013: „Modellierungsparameter für Blasenströmungen, Chemie Ingenieur Technik“, 85, pp.1023–1035
- Brücker C, 1999: "Structure and dynamics of the wake of bubbles and its relevance for bubble interaction", Physics of Fluids, 11, pp.1781-1796
- Cierpka, C., Segura, R., Hain, R., Kähler, C.J. 2010: "A simple single camera 3C3D velocity measurement technique without errors due to depth of correlation and spatial averaging for microfluidic", Measurement Science and Technology, 21, pp. 1-13
- Cierpka C., Kähler C.J. 2012: "Particle imaging techniques for volumetric three-component (3D3C) velocity measurements in microfluidics". Journal of Visualization, 15, pp 1-31
- Duineveld, P. C. 1995: "The rise velocity and shape of bubbles in pure water at high Reynolds number". Journal of Fluid Mechanics, 292, 325-332
- Haberman, W. L. R.. K. Morton. 1954: "An experimental study of bubbles moving in liquids". In Proc. Amer. Soc. Civil. Eng 80, pp. 379-429
- Hartunian, R. A., Sears, W. R. 1957: "On the instability of small gas bubbles moving uniformly in various liquids". Journal of Fluid Mechanics, 3, 27-47
- Klein S., Gibert M., Berut A., Bodenschatz E. 2013: "Simultaneous 3D measurement of the translation and rotation of finite-size particles and the flow field in a fully developed turbulent water flow", Meas Scie Tech 24, 024006
- Saffman, P. G. 1956. "On the rise of small air bubbles in water". Journal of Fluid Mechanics, 1, pp. 249-275
- Schlüter, M. 2011: „Lokale Messverfahren für Mehrphasenströmungen“, Chemie Ingenieur Technik 83, pp. 1084-1095
- Sommerfeld, M. Ed. 2004: "Bubbly Flows: Analysis, Modelling and Calculation", Springer-Verlag, 2004, ISBN 3-540-40791
- Prasser H.M., Krepper E., Lucas D., Zschau J., Peters D., Pietzsch G., Taubert W., Trepte M., 2000: "Fast Wire-Mesh Sensors for Gas-Liquid Flows and Decomposition of Gas Fraction Profiles According to Bubble Size Classes, Proceedings of the 4th Workshop on Measurement Techniques for Steady and Transient Mutiphase Flows", Rossendorf, Germany
- Prasser H.M., Beyer M., Carl H., Gregor S., Lucas D., Pietruskte H., Schütz P., Weiss F.P. 2007: "Evolution of the structure of a gas-liquid two-phase flow in a large vertical pipe", Nuclear Engineering and Design 237, pp. 1848-1861