

## **Verhalten einer einzelnen Blase in schwarmähnlicher Hintergrundturbulenz**

### **Behavior of a single bubble and its wake in swarm like background turbulence**

**K. Haase, C.J. Kähler**

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

Emulierte Hintergrundturbulenz, tomographisches PTV, Massentransport  
emulated bubble-like turbulence, tomographic PTV, mass transport

#### **Zusammenfassung**

Mit nicht intrusiven 3D-Messverfahren wurden das Aufstiegsverhalten von Luftblasen in Wasser, sowie der Nachlauf von frei aufsteigenden und in emulierter Schwarmturbulenz befindlichen einzelnen Blasen vermessen und charakterisiert. Dieses Paper zeigt den Unterschied zwischen den Strömungsstrukturen und den Einfluss der umgebenden Turbulenz auf das Aufstiegsverhalten auf. Für die Erzeugung der Turbulenz wird eine Gitterstruktur verwendet, die aus freibeweglichen Kugeln besteht und statistisch ähnliche Fluktuationen erzeugt, wie sie in realen Mehrphasenströmungen zu finden sind. Durch die Zugabe von chemischen Farbstoffen, lässt sich zusätzlich der Massentransport visualisieren und so mit den kohärenten Strukturen korrelieren. Das gelöste Gas wird über die Blasenoberfläche zu den Nachlaufwirbeln transportiert und in den entgegengesetzt drehenden Wirbeln angesammelt. Steigt die Blase in der künstlich erzeugten Turbulenz auf, so hält sie sich bevorzugt in Regionen mit niedriger Turbulenz auf und wird zufällig über den gesamten Kanal transportiert, bis diese in die Grenzschicht des Kanals gelangt und aus dem Messvolumen wegtransportiert wird. Die Nachlaufstrukturen der Blasen werden durch die Turbulenz verkürzt und zerfallen in weniger als einem Blasendurchmesser stromabwärts.

#### **Einleitung**

Mehrphasenströmungen werden in den unterschiedlichsten Bereichen der Industrie, Wissenschaft und Energieproduktion angewendet, von Bioreaktoren über Stahlverarbeitung bis hin zu Kernkraftwerken (Deckwer, 1985). Blasen werden dabei nicht nur als Transportmittel für Chemikalien verwendet, sondern auch um den Wärmetransport und Mischprozess zu verbessern. In den meisten technischen Anwendungen werden kleine Blasen im Bereich von ~1-10 mm mit Volumendichten von 10 Vol.-% verwendet. Es ist einleuchtend, dass der Transfer von Chemikalien von der Blase in die Flüssigkeit von der umgebenden Strömung abhängt. Jedoch auch die Geometrie der Blase ist entscheidend, da durch Deformation sich die Oberfläche verändert und so der Massentransport verstärkt oder verringert werden kann. Um dieses Zusammenspiel der einzelnen Mechanismen besser zu verstehen, muss der Zusammenhang zwischen den einzelnen Blasen im Schwarm und der Umgebungsstrukturen genau untersucht werden. Für hohe Gasdichten, wie sie industriell verwendet werden, können nur intrusive Methoden, wie Heißfilm-Anemometer oder Elektrodifusions-Methoden (Mießner et al., 2017) verwendet werden. Diese Proben jedoch verursachen unbekannte

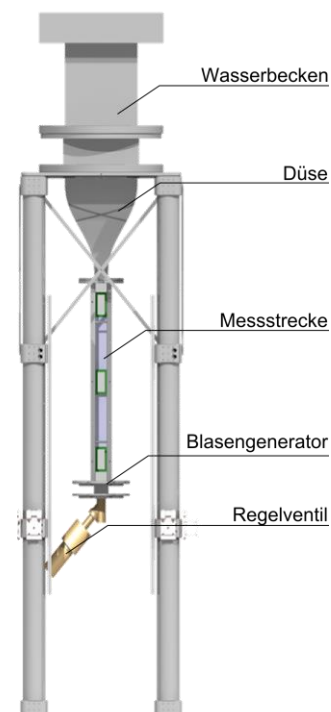
Störungen, nicht nur an den Blasen, sondern auch in der Strömung des Nachlaufes. Durch die Verwendung von optischen Methoden kann das System ungestört beobachtet werden. Aber im Gegenzug können nur Schwärme mit geringen Blasendichten (etwa 1-2 Vol.-%), aufgrund der optischen Abschattung untersucht werden. In dieser Arbeit wird die blaseninduzierte Turbulenz künstlich erzeugt, um so eine einzelne oder eine kleine Gruppe von Blasen in schwarmähnlicher Turbulenz mit hochauflösenden optischen Methoden zu untersuchen. Die künstliche Turbulenzgenerierung erfolgt mittels eines Gitters, welches aus kleinen Plastikugeln aufgebaut ist. Da die Elemente des Gitters nur Vertikal miteinander verbunden sind, können die einzelnen Kugeln sich annähernd frei senkrecht zur Strömungsrichtung bewegen. Diese Gitter wurden an der Universität in Bremen entworfen und hergestellt. Diese Gitter wurden in die Gegenstromanlage an der Universität der Bundeswehr in München integriert und charakterisiert (Haase et al., 2017, Mießner et al., 2017).

Ein Vergleich von frei aufsteigenden und in der Turbulenz befindlichen Blasen wird im Folgenden präsentiert. Für die frei aufsteigenden Blasen wurde zusätzlich eine Chemikalie zugeben, die es erlaubt den Massentransport sichtbar zu machen und so das Zusammenspiel zwischen den Nachlaufstrukturen und des Massentransportes genauer zu studieren.

Im Folgenden werden der experimentelle Aufbau sowie die verwendeten Techniken genauer erläutert. Die Ergebnisse der frei aufsteigenden Blasen sind in Abschnitt 3.1 mit Hinblick auf die unterschiedlichen Nachlaufstrukturen dargestellt und in Abschnitt 3.2. ist die Bewegung mit Einfluss der Turbulenz aufgeführt.

## Experimental Setup

Die Experimente wurden im Gegenstromkanal (siehe Abb. 1) an der Universität der Bundeswehr in München durchgeführt. Die Flussgeschwindigkeiten können mit einem elektronischen Regelventil am unteren Ende des Kanals frei gewählt werden. Damit können Flussge-



**Abb.1** Schematische Darstellung des Gegenstromkanals. Die Flussgeschwindigkeit wird durch ein elektrisches Ventil am Ende der Messstrecke reguliert. Um eine kontinuierliche Strömung zu erzeugen, wird das Fluid wieder in das Wasserbecken gepumpt. Die Turbulenzerzeuger befinden sich zwischen der Messstrecke und der Düse.

schwindigkeiten bis zu 0.5 m/s erreicht werden, um die Blase an der gewünschten Position in Relation zum ortsfesten Kamerasystem zu halten. Dies erlaubt es die Blasen für eine längere Zeit im Beobachtungsfenster zu verfolgen. Die Turbulenzerzeuger sind oberhalb der Messstrecke eingebaut. In (Haase et al., 2017) wurden verschiedene Partikelgitterbauarten (Partikelgrößen und Volumendichten) charakterisiert. Für die Experimente die in diesem Beitrag vorgestellt werden, wurde ein Gitter mit 5 mm Kugeln und 10 Vol.-% verwendet.

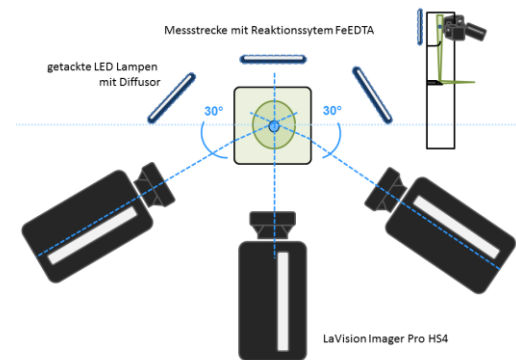
Ein tomographischer Drei-Kameraaufbau wurde um die Messstrecke aufgebaut, um die Dynamik der Blasen im Volumen zu studieren. Die Kameras wurden, wie in Abb. 2 gezeigt in einem 30° Winkel positioniert.

Mit drei Imager Pro HS von LaVision und einem CW-Laser wurden Daten mit bis zu 1.2 kHz aufgenommen.

Zur Visualisierung des Stoffübergangs von der Blasenoberfläche in die Flüssigkeit wurde, eine speziell hergestelltes Reaktionssystem in Kanal verwendet (Prof. Klüfers, LMU Munich Germany; Aas et al., 2016). Dieses verwendet Eisen(III) Sulfat Heptapentrat und N-(2-Hydroxyethyl) ethylenediamine -N,N',N'-triacetic Säure, um eine Reaktion bei Sauerstoffkontakt hervor zu rufen. Als Trägersubstanz für den Sauerstoff diente Stickstoff, weshalb NO-Blasen (Stickstoffmonoxid) für die Experimente verwendet wurden. Der Sauerstoff in den Blasen bindet sich an das Eisen in der Flüssigkeit, was dann zu einer sichtbaren dunkel Färbung führt. Um die Blase und die Farbe besser zu erkennen und auszuwerten, wurden zusätzlich LED Hintergrundlichter und ein Diffusor auf der gegenüberliegenden Seite der Kameras angebracht. Um die Daten des Strömungsfeldes und der Schattenaufnahmen miteinander zu korrelieren, wurden nacheinander mit einem Phasenversatz ein Schattenbild und ein Partikelbild aufgenommen. Dies führte zu einer effektiven Aufnahmerate von 0.6 kHz für die Schatten- und Partikelbilder. Zur Aufnahme wurde die kommerzielle Software DaVis von LaVision verwendet.

Für die Bewegung in der emulierten Turbulenz wurden dahingegen nur Partikelbilder aufgenommen, da eine höhere Aufnahmerate vonnöten ist, um die kohärenten Strukturen in der Strömung auflösen zu können, was eine alternierende Aufnahme nicht ermöglicht. Für diese Experimente wurden Bilder mit 2 kHz aufgenommen. Die Auswertung erfolgte mit einem hauseigenen Algorithmus (Fuchs, et al., 2016).

Für beide Einstellungen wurden mehrere Blasen aufgenommen und ausgewertet. In den folgenden Abschnitten sind die Ergebnisse beschreiben, beginnend mit den frei aufsteigenden Blasen (sowohl Strömungsfeld als auch Schattenaufnahmen) gefolgt von den Ergebnissen im turbulenten Regime.



**Abb.2** Schematische Darstellung des Kameraaufbaus mit gesteuerter Hintergrundbeleuchtung. Für einen besseren Kontrast in den Schattenbildern werden blaue LEDs als Hintergrundbeleuchtung verwendet.

**Table 1** Parameter des Experiments

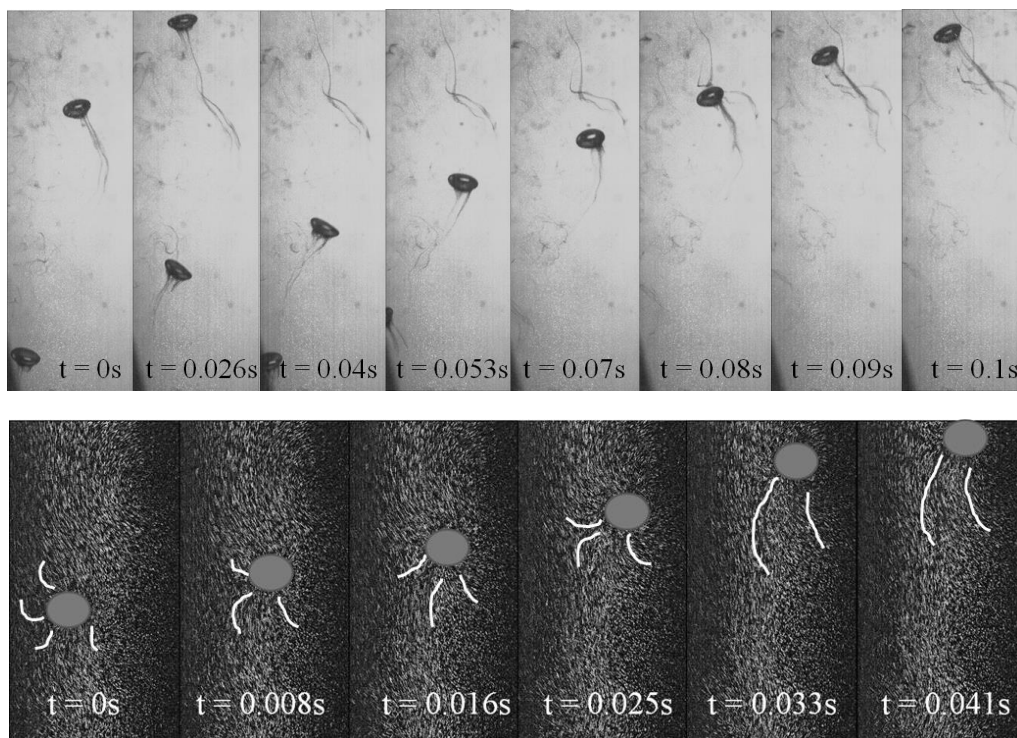
<b>Blasen Parameter</b>	
Größe $d_B$ [mm]	3-4
Reynoldszahl $Re_B$	750
<b>Gitter Parameter</b>	
Partikel Größe $d_p$ [mm]	5
Vol.-%	10

## Ergebnisse und Diskussion

### Frei aufsteigende Blase und Visualisierung des Massenübergangs

Um die Bewegung der Blasen und das Verhalten dessen in einem Schwarm besser zu verstehen, muss jeder Aspekt der Bewegung und Interaktion berücksichtigt und getrennt voneinander untersucht werden. Für beide Fälle wurde der Zusammenhang zwischen dem Aufstiegsverhalten und der Nachlaufstruktur untersucht und im diskutiert.

Die Bewegung einer frei aufsteigenden NO-Blase ist in den Abb. 4 und Abb. 5 zu finden. Während die Blase noch senkrecht von der Kapillare aufsteigt ist hinter der Blase eine Konus förmige Struktur zu erkennen bis die Blase in die zig-zack Bewegung übergeht. Zwei Nachläufe entstehen hinter der Blase (Abb. 3a  $t = 0.026 - 0.053$  s). Diese Nachläufe wachsen an und gewinnen an Länge bis die Blase ihre Richtung ändert wobei die Enden der Nachläufe beginnen zu zerfallen (Abb. 3a  $t = 0.07$  s). Nach der Richtungsänderung beginnen die Nachläufe erneut zu wachsen bis die Blase erneut ihre Richtung ändert. (Abb. 3a  $t = 0.07$  s –  $0.1$  s). Wie in den Geschwindigkeitsdaten (Abb. 3b) zu sehen ist, erzeugen die Blasen einen Nachlauf und die Wirbel bleiben stationär. Nachdem die Blase in das Messvolumen eintritt (Abb. 3b  $t = 0$  s) beginnt der Nachlauf sich zu formen und die zig-zack Bewegung stellt sich ein. Der Nachlauf formt sich und beginnt zu wachsen (Abb. 3b  $t = 0.008$  s –  $0.025$  s) bis sich die Bewegung der Blase ändert (Abb. 3b  $t = 0.033$  s –  $0.041$  s). Wie in de Vries (de Vries, 2002) und Brücker (Brücker, 1999) beschrieben, bestehen die Wirbel aus sich



**Abb. 3a)** Zeitreihe einer aufsteigenden Blase. Im ersten Bild ist die Entstehung der Nachlaufstrukturen zu beobachten. Nach einer Richtungsänderung der Blase verändert sich der ursprüngliche Konus in die zwei Haarnadel Strukturen. Diese werden länger, so lange wie die Blase aufsteigt und zerfallen, sobald eine erneute Richtungsänderung erfolgt.

**Abb. 3b)** Visualisierung der Strömung um eine freiaufsteigende Blase. Für eine bessere Darstellung wurde der Nachlauf mittels Linien markiert. Für jeden Zeitschritt wurde ein Mittelwert über fünf Bilder verwendet. Im ersten Bild bewegt sich die Blase in das Messvolumen und ändert die Aufstiegsrichtung in die Messebene, In den darauffolgenden Bildern ist die Entstehung des Nach-

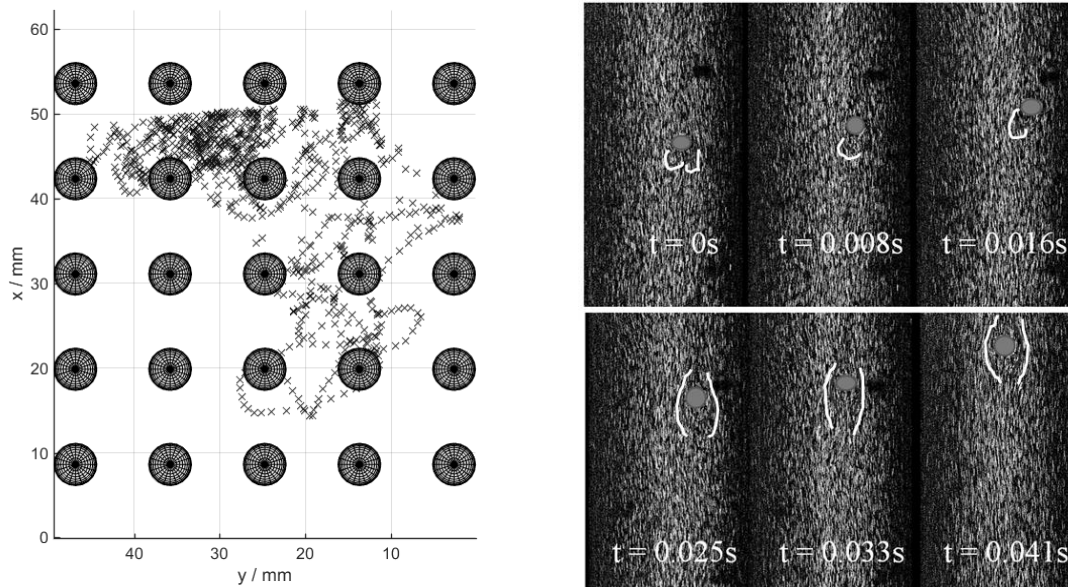
entgegengesetzt rotierenden Haarnadelstrukturen. Das Aufstiegsverhalten ist durch die Größe der Blase bestimmt (Brücker, 1999). Während kleine Blasen eine zig-zack Bewegung ausführen ist für größere Blasen eine spiralförmige Bewegung zu beobachten. Für kleine Blasen wird in Brücker gefolgert, dass das Verhalten der Haarnadelwirbel aus der Bewegung der Blase resultiert. Brücker folgert, dass die Haarnadelwirbel sich schließen, sobald die Blase ihren Umkehrpunkt erreicht. Abb. 3a zeigt, dass das Gas von der Blasenoberfläche an das hintere Ende über die Oberfläche transportiert wird und in den Wirbeln sich sammelt (Sichtbar durch die dunkle Färbung) bis diese sich auflösen, was so auch in diesen Experimenten zu beobachten ist.

### **Langsam aufsteigende Blasen in turbulenter Hintergrundströmung**

Um besser die Bewegung in Mehrphasenströmungen zu verstehen wurden zudem einzelne Blasen in einer turbulenten Hintergrundströmung untersucht. Die Blasen wurden in einer emulierten Turbulenz erzeugt und steigen langsam im Gegenstrom auf. Für die Turbulenzerzeugung wurden beweglichen Partikelgitter verwendet (Haase et al., 2017). Die Blasen bewegen sich in einer eher zufälligen Bewegung über den gesamten Kanal. Bei genauerem betrachten ist zu beobachten, dass die Blasen sich in Gebieten mit geringer Turbulenz bevorzugt aufhalten (Abb. 4a). Direkt unterhalb eines Gitterelementes herrschen erhöhte Fluktuationen, in allen Richtungen. Abhängig von der ursprünglichen Position der Blase bewegt sich diese zum nächstgelegenen Gebiet zwischen zwei Gitterelementen, in denen eine geringere Turbulenz herrscht. Wenn sich die Blasen unter eine Kugel bewegen, werden diese in Richtung des Partikelgitters auf Grund des Nachlaufes der Kugel beschleunigt. Mit zunehmender Größe der Blase wird die Bewegung der Blase zunehmend zufälliger. Die Ablösung der Wirbel hinter den Blasen wird unsymmetrisch und drückt die Blase in bestimmte Richtungen. Resultierend aus den erhöhten Fluktuationen und dem somit erhöhten turbulenten Druck werden die Blasen in Gebiete mit geringerem Druck gezwungen. Jedoch haben auch Schereffekte, resultierend aus den Geschwindigkeitsgradienten einen erheblichen Einfluss auf die Blasenoberfläche und induzieren Kräfte, die die Blase in Gebiete zwischen den Kugeln bewegen. Während kleine Blasen sich länger in diesen Gebieten aufhalten und nur kurze Strecken in die benachbarten Gebiete zurücklegen, bewegen sich größere Blasen, welche zudem deformierbar sind, über die gesamte Kanalfläche. Die großen Blasen erfahren einen größeren Druckgradienten über das gesamte Volumen was es nicht möglich macht, dass sie sich in die Bereiche der niedrigen Turbulenz anzusiedeln.

In realen Blasenschwärmen ist die Bewegung einzelner Blasen durch die Anwesenheit des Schwarmes räumlich beschränkt. Der Schwarm stabilisiert die Bewegung der Blase und diese kann so in einem eingeschränkten Raum aufsteigen. Bewegt sie sich hingegen lediglich in einem turbulenten Fluid, so kann die Blase den weg der geringsten Turbulenz nehmen, was in einem scheinbar zufälligen Muster stattfindet.

Aufgrund der Hintergrundturbulenz wird der Blasennachlauf gekürzt und zerfällt etwa einen Blasendurchmesser stromabwärts (Abb. 4b). Wie auch schon in Abb. 3b wird die Blase in das Messvolumen transportiert. In dieser künstlichen Turbulenz wird der ursprüngliche Nachlauf der Blase schneller durch die umgebenden Fluktuationen zerstreut was die zufällige Bewegung weiter verstärkt. Gelangt die Blase in ein Gebiet mit geringerer Turbulenz, so kann sich der ursprüngliche Nachlauf erneut ausbilden, da die Blase ungehindert aufsteigen kann. Aufgrund der sich ständig ändernden Hintergrundturbulenz ist es der Blase möglich nur für kurze Zeit ungehindert aufzuzeigen, bis sich der Nachlauf wieder zerstreut wird. Diese Bewegung wiederholt sich, bis die Blase zufällig in die Grenzschicht des Kanals transportiert wird und aus dem Messvolumen verschwindet.



**Abb. 4a)** Beispiel einer Bewegung einer kleinen Blase (~4 mm) in der turbulenten Strömung eines Partikelgitters (Ansicht von oben) Die offenen Kreise markieren die Position der Blase zu einem Zeitpunkt. Die großen Kugeln die Ausgangsposition der Gitterelemente

**Abb. 4b)** Visualisierungen der Strömung um eine, im Gegenstrom (0.2 m/s) aufsteigende Blase. Erneut wurde zur besseren Darstellung die Nachlaufstruktur mit Linien markiert. Im ersten Zeitschritt bewegt sich die Blase ins Messvolumen und steigt weiter auf, es zeigt sich in den nächsten Zeitschritten wie der Nachlauf ausgebildet wird. Jedoch im Vergleich zu Abb. 3 kann sich der Nachlauf nicht ausbilden und wird von der umgebenden Strömung abgelöst.

## Zusammenfassung

Um das Verhalten einzelner Blasen in einem Blasenschwarm zu untersuchen, wurde in dieser Arbeit eine Methode zur simultanen Messung des Strömungsfeldes und des Massentransportes mittels einer chemischen Reaktion vorgestellt. Mit einem tomographischen Kameraaufbau war es möglich Strömungsdaten um die Blase zu rekonstruieren sowohl für eine frei aufsteigende Blase als auch in einer schwarmähnlichen Turbulenz.

Die frei aufsteigende Blase und die Visualisierung des Massentransportes zeigten, dass das Gas über die Blasenoberfläche an das hintere Ende der Blase transportiert wird und in den Haarnadel-Wirbeln gesammelt wird, bis diese ablösen und zerfallen.

In der künstlich erzeugten Schwarmturbulenz können die Blasen nicht mehr ihrem natürlichen Pfad folgen, da die Blasen Geschwindigkeitsgradienten und Fluktuationen ausgesetzt sind, die die Bewegung der Blase vorgeben und die Nachlaufstrukturen verwirbeln. Es zeigte sich, dass die Blasen sich bevorzugt in Gebiete mit geringer Turbulenz aufhalten und von den Druckgradienten dort hin transportiert werden. Während die kleinen Blasen in diesen Gebieten verweilen, werden größere Blasen über den gesamten Kanal transportiert und können sich nicht in den turbulenten Gebieten sammeln.

## Dankesworte

In diesem Teil möchten die Autoren Prof. Klüfers und seinen Mitarbeitern Bianca Aas und Martin Ossberger für die wertvolle Unterstützung bei der Herstellung und die Integration des Reaktionssystems in die Gegenströmanlage danken. Zudem möchten die Autoren Thomas Fuchs und Dr. Matthew Bross danken für die Unterstützung beim Aufbauen des Kamerasystems.

Dieses Project wird von der DFG als Teil des Schwerpunktprogrammes 1740 „Reaktive Blasenströmungen“ finanziert.

## Literatur

**Aas, B., Klüfers P., 2017:** “The Structural Chemistry of Stable High-Spin Nitrosyl–Iron(II) Compounds with Aminocarboxylato Co-Ligands in Aqueous Solution”, EurJIC,

**Brücker, C., 1999:** “Structure and dynamics of the wake of bubbles and its relevance for bubble interaction” Physics of Fluid., 11,1781,

**Deckwer, W.D., 1985:** „Reaktionstechnik in Blasensäulen“, Verlag Salle und Sauerländer, Frankfurt am Main,

**Fuchs, T., Hain, R. & Kähler, C.J., 2016:** Double-frame 3D-PTV using a tomographic predictor. Exp Fluids 57, 174,

**Haase, K., Kück, U.D., Thöming, J., Kähler, C.J., 2017:** “On the emulation of bubble induced turbulence by randomly moving particles in a grid structure”. CET, submitted.

**Mießner U., Kück, U.D., Haase, K., Kähler, C.J., Fritsching, U., Thöming, J., 2017:** “An approach to mimic swarm turbulence in reactive bubbly flows”. CET, submitted.

**de Vries, A. W. G., Biesheuvel, A., van Wijngaarden, L., 2002:** “Notes on the path and wake of a gas bubble rising in pure water”, Int. J. Multiphase Flow, 28, 1823–1835