

PIV-Untersuchungen zur Randbedingung an Blasengrenzflächen

PIV investigations on boundary conditions at bubble interfaces

B. Gaertner, F. Peters

Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Universitätsstr. 150
44780 Bochum
bjoern.gaertner@rub.de

Schlagworte: Weißlicht PIV, Blasen, Grenzflächen
Keywords: white light PIV, bubbles, interface

Einleitung

Die Bewegung kleiner Blasen in Flüssigkeiten wird klassischerweise als ein 2-Phasenproblem gesehen, in dem die beiden Phasen über Kontaktflächen gekoppelt sind. Die Kopplungsbedingungen sind gleiche Schubspannung auf beiden Seiten und Druckanpassung über die Laplacegleichung [s. Clift et al. 1978]. Eine solche Betrachtungsweise müsste eine eindeutige Umströmung hervorbringen mit z.B. eindeutigen Aufstiegs- und Abstiegsgeschwindigkeiten von Blasen in Flüssigkeiten. Verschiedentlich wurde aber gezeigt [Duineveld 1995, Peters und Biermann 2004, Fries 2006], dass Gasblasen in Wasser (je nach Wasser) sehr verschiedene Aufstiegs- und Abstiegsgeschwindigkeiten zeigen. Im Grenzfall verhalten sich Blasen in Wasser wie feste Kugeln. Dies führt auf die Vermutung, dass zwischen den beiden Phasen eine dritte Form einer starren Trennschicht existiert. Vielfach wird vermutet, dass es sich hier um die Anlagerung von oberflächenaktiven Substanzen handelt (surfactants). Diese Hypothese wurde bisher allerdings nicht direkt bestätigt.

In dieser Arbeit versuchen wir zunächst einmal das Strömungsfeld um eine stationäre Blase mit PIV (Particle Image Velocimetry) zu untersuchen um eine klare Antwort auf die Frage zu geben, ob die Geschwindigkeit an der Grenzfläche tatsächlich auf Null zurück geht. Dies wäre ja die notwendige Voraussetzung um ein Widerstandsverhalten fester Oberflächen (Kugeln) zu bekommen.

Dazu wurde eine stationäre Blase an der eingetauchten Öffnung eines Rohres erzeugt. Ein Pumpenumlauf sorgt für die Umströmung der Blase. Experimente wurden mit Luft in Wasser und Öl durchgeführt. Um den direkten Vergleich zur festen Oberfläche zu haben, wurden die Blase durch eine Stahlkugel ersetzt.

Experimenteller Aufbau

Der für die Messungen verwendete Aufbau ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

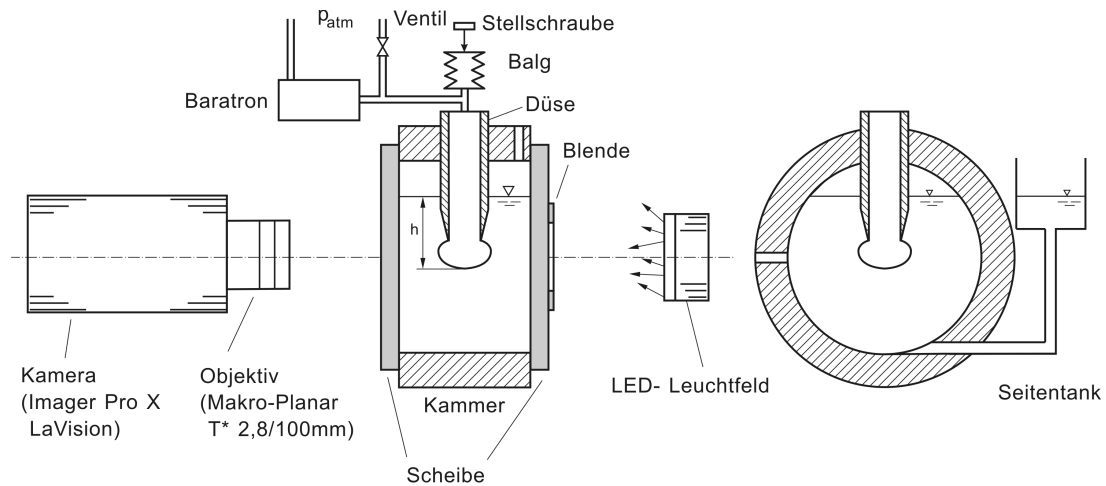


Abb. 1: Experimenteller Aufbau

Zentrales Element des Aufbaus bildet die Kammer, in der die Blase erzeugt wird. Sie besteht aus Edelstahl und hat einen Innendurchmesser von 42mm . Der optische Zugang zur Kammer wird über zwei gegenüberliegend angeordnete Borosilikatglasscheiben (Abstand 30mm) ermöglicht. In die Mitte der Kammer wird eine scharfkantige Düse (Innendurchmesser 8mm) von oben eingelassen. Diese ist über einen starren Schlauch mit einem Ventil und einem Balg verbunden, dessen Volumen über eine Stellschraube variiert werden kann. Bei geschlossenem Ventil lässt sich so am eingetauchten Ende der Düse eine Gasblase erzeugen. Die starren Schläuche garantieren einen stabilen Druck innerhalb des Systems. Ein ebenfalls in das System integriertes Baratron dient zur Messung des Differenzdrucks zwischen dem Druck in der Blase und dem Umgebungsdruck.

Die Kammer ist über Schläuche in einen Pumpenumlauf integriert, um eine Strömung innerhalb der Kammer zu erzeugen. Dabei strömt das Fluid durch den Seitentank in die Kammer und tritt auf der gegenüberliegenden Seite durch eine Bohrung wieder aus (siehe Abb. 1 u. 2).

Die Messung des Strömungsfeldes um die stationäre Blase wird mittels Particle Image Velocimetry (PIV) durchgeführt. Durch die Konstruktion der Kammer bedingt, kann die Messung nicht im klassischen PIV-Verfahren durchgeführt werden, bei dem ein doppelt gepulster Laserschnitt im 90° Winkel zur Kamera verwendet wird. Stattdessen wird das deutlich weniger verbreitete Gegenlichtverfahren genutzt, bei dem Kamera und Beleuchtung auf einer optischen Achse angeordnet sind.

Das optische System besteht aus der Beleuchtung und einer CCD-Kamera (Imager pro X von LaVision) mit Objektiv (Makro-Planar T* 2,8/100mm). Für die Beleuchtung wird ein LED-Feld ($43 \times 35\text{mm}^2$) verwendet, welches Weißlicht mit einer sehr guten Homogenität erzeugt. Auf Grund der unterschiedlichen Brechungsindizes von Luft und Wasser bzw. Öl, werden sämtliche Lichtstrahlen, die die Grenzfläche treffen, entweder reflektiert oder treten in die Blase ein. Diejenigen, die in die Blase eintreten werden innerhalb mehrfach reflektiert und verlassen die Blase nicht mehr. Lediglich ein kleiner Teil an Lichtstrahlen in unmittelbarer Nähe zur optischen Achse tritt ohne Reflexion durch die Blase hindurch.

Auf einen gedachten Schirm hinter der Kammer treffen also die Strahlen, die parallel zur optischen Achse die Grenzfläche gerade eben nicht berühren, sowie die Strahlen, die von der Grenzflächen mit sehr kleinen Winkeln reflektiert werden. Somit würde auf dem Schirm ein Schatten der Blase, mit einem unscharfen Randbereich, entstehen. Durch den Einsatz des Objektivs wird der unscharfe Bereich letztendlich scharf auf dem CCD-Chip der Kamera ab-

gebildet. Der sehr geringe Tiefenschärfebereich des Objektivs garantiert, dass die Kamera exakt auf die Mittelebene der Blase scharf gestellt ist.

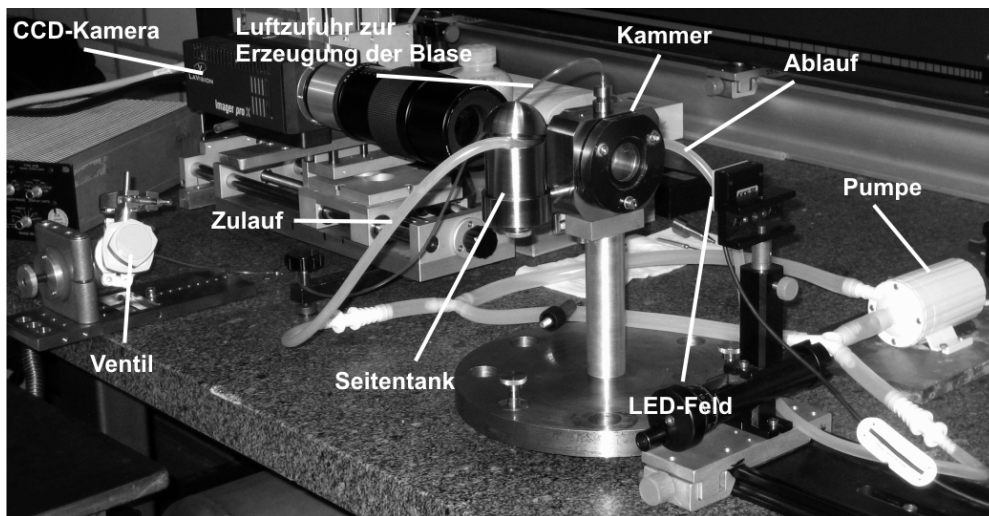


Abb. 2: Foto des experimentellen Aufbaus

Mess- und Auswertungseinstellungen

Die CCD-Kamera verfügt über einen Chip von $2048 \times 2048 \text{pix}^2$ und kann max. 14 Bilder pro Sekunde aufnehmen. Da das Weißlicht des LED-Feldes über eine geringere Intensität verfügt als Laserlicht, muss die Belichtungszeit angepasst werden, was zu einer Reduzierung der Aufnahme Frequenz führt, außerdem erlaubt die deutlich geringere Lichtintensität keine Doppelbildaufnahmen, so dass die Aufnahmen im Single-Frame-Modus gemacht werden. Die eingestellte Belichtungszeit von 4ms führt zu einer Aufnahme Frequenz von etwa $13,7 \text{Hz}$, was einer Zeit von 73ms zwischen zwei aufeinander folgenden zu korrelierenden Aufnahmen entspricht.

Die Auswertung der Aufnahmen wird mit dem Programm DaVis 7.2.2 der Firma LaVision durchgeführt. Die Startgröße des Auswertefensters liegt bei $128 \times 128 \text{pix}^2$ und einer Überlappung von 50%, diese wird in drei Berechnungsdurchläufen auf eine Größe des Auswertefensters von $32 \times 32 \text{pix}^2$ mit einer Überlappung von 0% reduziert. Legt man die Ein-Viertel Regel [Raffel et al. 2008] als Grenze der Partikelverschiebung zu Grunde, lässt sich mit den ausgewählten Einstellungen max. eine Geschwindigkeit von ca. 3mm/s sinnvoll auflösen.

Als Tracer-Partikel werden Hohlglaskugeln mit einem mittleren Durchmesser von $10 \mu\text{m}$ verwendet. Diese folgen sowohl im Wasser, als auch im Silikonöl der Strömung sehr gut. Auf Grund der geringen Tiefenschärfe des verwendeten Objektivs, werden lediglich Partikel in der untersuchten Ebene scharf abgebildet.

Pro Messung werden 50 Einzelbildaufnahmen gemacht, woraus sich 49 Vektorbilder ergeben. Abschliessend wird eine Mittelung aller Vektorbilder einer Messung durchgeführt.

Tab. 1 zeigt die zur Messung verwendeten Stoff- bzw. Materialkombinationen. Bei dem zur Messung verwendeten Wasser, handelt es sich um vollentsalztes Wasser. Das Silikonöl AK10 ist von der Firma Wacker und besitzt eine Dichte von $\rho = 0,93 \text{g/cm}^3$ bei 25°C und eine kinematische Viskosität von $\nu = 10 \text{mm}^2/\text{s}$.

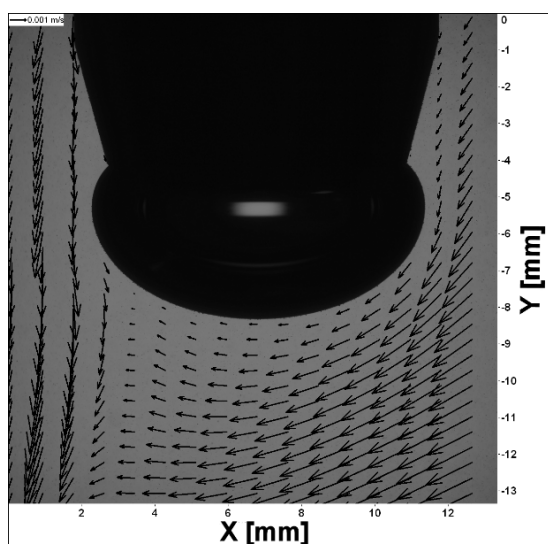
Tab. 1: Stoff- bzw. Materialkombinationen

	vollentsalztes Wasser	Silikonöl AK10
Luft	X	X
Metallkugel	X	X

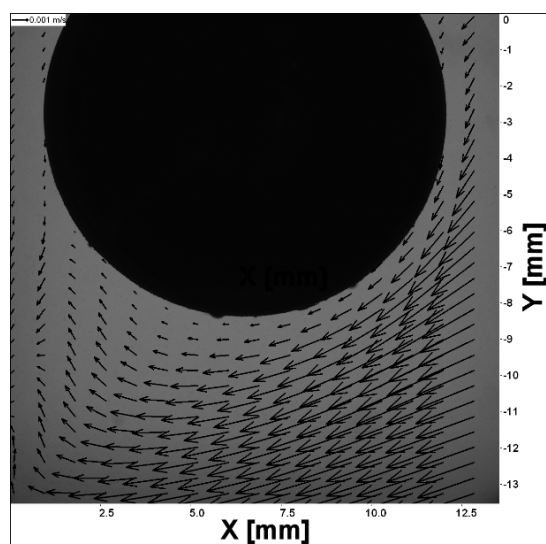
Die Metallkugel hat einen Durchmesser von 11mm und wird als Referenz benutzt, da die Haftbedingung an ihrer Kontaktfläche zum umgebenden Medium sicher ist.

Ergebnisse

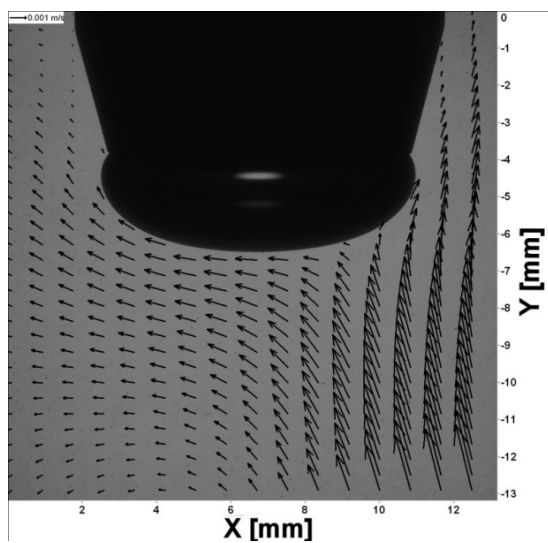
Die folgenden Abbildungen 3 (a) - (d) zeigen die Geschwindigkeitsfelder um die Luftblase bzw. Metallkugel in Wasser und Silikonöl.



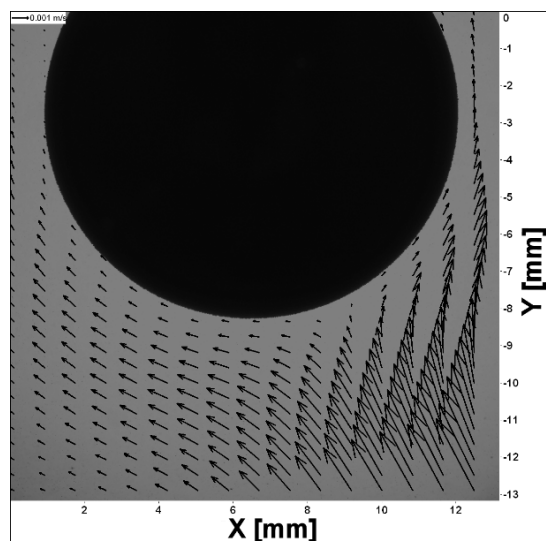
(a) Luftblase in vollentsalztem Wasser



(b) Metallkugel in Wasser



(c) Luftblase in Silikonöl AK10



(d) Metallkugel in Silikonöl AK10

Abb. 3: Geschwindigkeitsfelder; Maximale Geschwindigkeiten: 3mm/s

Ein Vergleich der Abb. 3 (a) und (b) zeigt, dass es sich in einem Bereich von etwa 4mm bis 10mm auf der x-Achse um sehr ähnliche Strömungsverhältnisse handelt. Die Geschwindigkeit der Strömung nimmt in beiden Fällen zur Kontaktfläche hin ab, wie es bei einer festen, starren Oberfläche erwartet wird.

Die Abb. 3 (c) und (d) zeigen hingegen ein unterschiedliches Bild bei der Betrachtung der Strömung im Kontaktflächenbereich. Während bei der Metallkugelumströmung mit Silikonöl (Abb. 3 (d)) die Geschwindigkeit ebenfalls, wie erwartet, zur Oberfläche hin abfällt, ist dies bei der Umströmung der Luftblase in Silikonöl (Abb. 3 (c)) nicht der Fall. Im Gegenteil, die Geschwindigkeit steigt zur Oberfläche hin sogar noch an.

Offensichtlich verhalten sich die Oberflächen zwischen Luft und Wasser bzw. Luft und Silikonöl völlig unterschiedlich und gegensätzlich zueinander. Während in dem einen Fall (Luftblase in Wasser) die Oberfläche starr zu sein scheint und sich nicht mit der Strömung mitbewegt, wird im anderen Fall (Luftblase in Silikonöl) die Oberfläche von der Strömung mitgerissen und bewegt sich mit dieser mit.

Die folgenden Abb. 4 und 5 zeigen jeweils ein markiertes Partikel, welches etwa $25\mu\text{m}$ von der Grenzfläche entfernt ist. Für beide Partikel wurde der zurückgelegte Weg in aufeinander folgenden Bildern ermittelt und daraus die Geschwindigkeit tangential zur Grenzfläche berechnet. Tab. 2 zeigt die Geschwindigkeit für einige Fälle.

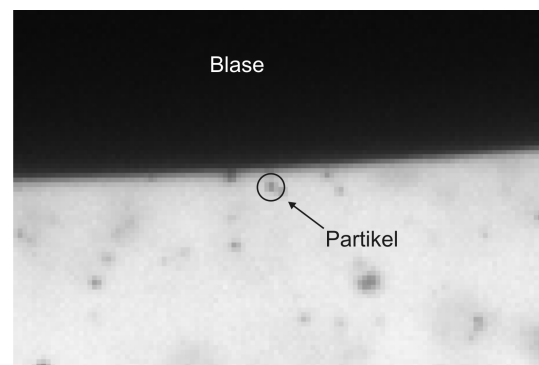
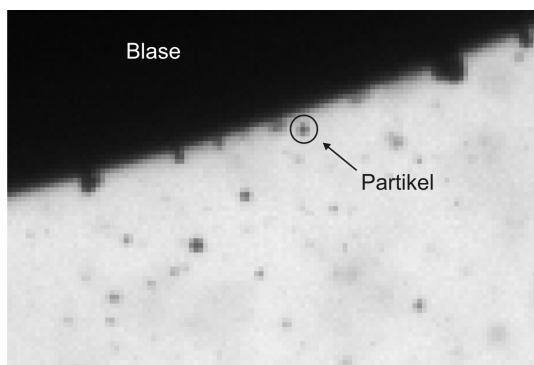


Abb. 4: Partikel in Grenzflächennähe; Luft - Wasser Abb. 5: Partikel in Grenzflächennähe; Luft - Silikonöl

Tab. 2: Geschwindigkeit (in mm/s) in unmittelbarer Nähe der Grenzfläche

	Wasser - Luft	Silikonöl - Luft
Bild 1 / Bild 2	0,46	1,24
Bild 2 / Bild 3	0,37	0,89
Bild 3 / Bild 4	0,57	1,16
Bild 4 / Bild 5	0,37	1,15

Wie Tab. 2 entnommen werden kann, sind die Geschwindigkeiten im System Wasser - Luft bei etwa gleicher Entfernung zur Grenzfläche zwei bis drei mal kleiner, als im System Silikonöl - Luft. Dadurch wird der erste visuelle Eindruck aus Abb. 3 weiter bekräftigt, dass ein Unterschied zwischen beiden Grenzflächen besteht. Des Weiteren deuten die deutlich niedrigeren

Geschwindigkeiten bei einer Umströmung mit Wasser darauf hin, dass die Geschwindigkeit tatsächlich gegen Null an der Grenzfläche strebt.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle angemerkt, dass im System Wasser - Luft auch solche Partikel gefunden wurden, die offensichtlich direkt Kontakt mit der Grenzfläche haben, aber trotzdem eine von Null verschiedene Geschwindigkeit aufweisen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass ein großer Teil des Partikels in die Scherschicht um die Blase ragt und die Kräfte, die dabei auf das Partikel wirken, dieses in eine Bewegung versetzen.

Fazit

Ziel der durchgeführten Messungen war es, das Verhalten der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser im Verhältnis zu anderen Grenzflächen (Luft/Silikonöl, Wasser/Metallkugel, Silikonöl/Metallkugel) zu zeigen. Das starre Oberflächenverhalten der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser, das bereits aus früheren Messungen der Aufstiegsgeschwindigkeit bekannt ist (F. Peters, S. Biermann, 2004; Duineveld, P.C., 1995), konnte hierbei bestätigt werden und durch Strömungsgeschwindigkeitsmessungen um die Grenzfläche mittels Particle Image Velocimetry visualisiert werden.

Außerdem wurden Partikelgeschwindigkeiten in direkter Nähe zur Grenzfläche untersucht, mit dem Ergebnis, dass zum einen ein quantifizierbarer Geschwindigkeitsunterschied zwischen beiden Systemen (Wasser - Luft, Silikonöl - Luft) besteht und zum anderen die Geschwindigkeit bei einer Umströmung mit Wasser tatsächlich zu sehr kleinen Werten bzw. gegen Null strebt.

Auf Grund der verwendeten Aufnahmevariante und der relativ kleinen Blasenkommer, können nur sehr kleine Strömungsgeschwindigkeiten um die Blase untersucht werden. Im nächsten Schritt sollen die Geschwindigkeitsfelder bei deutlich höheren Umströmungsgeschwindigkeiten (bis zu 0.4m/s) in einer dafür entwickelten Drehkommer [Peters und Biermann 2004] untersucht werden. Dabei wird die Luftblase in eine vollständig mit Wasser gefüllte, rotationssymmetrische Kommer gegeben und die Kommer dann über einen Elektromotor in Bewegung gesetzt. Dabei wirkt der Auftriebskraft der Strömungswiderstand durch die Anströmung entgegen, wodurch sich die Blase an einer Position stabilisiert. In diesem Zustand kann das Geschwindigkeitsfeld um die Blase mittels PIV festgehalten werden. Unter Verwendung eines optischen Diffusers, der vor einem doppelt gepulsten Laser montiert wird, wird es dann auch möglich sein, deutlich höhere Geschwindigkeiten aufzulösen.

Danksagung

Dieses Projekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. (Pe401/27-1)

Literatur

Clift, R., et al., 1978: „Bubbles, Drops and Particles“, Dover Publications, Inc.

F. Peters, S. Biermann, 2004: „Streulichtuntersuchungen an einem kleinen, levitierten Bläschen“, Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik, 12. Fachtagung der GALA e.V., Shaker Verlag.

Duineveld, P.C., 1995: „The rise velocity and shape of bubbles in pure water at high Reynolds number“, Journal Fluid Mechanic, Vol. 292, pp. 325-332

Fries, N., 2006: „Experimentelle Untersuchung zum Aufstiegsverhalten kleiner, fluider Kugeln in einer Drehkammer“, Diplomarbeit

Raffel, M., 2008: „Particle Image Velocimetry“, Springer Verlag