

PIV-Untersuchungen zur Randbedingung an levitierten Blasen in einer Drehkammer

PIV investigations on boundary conditions at levitated bubbles in a rotating chamber

B. Gaertner, F. Peters

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

Schlagworte: Blasen, Grenzflächen, Durchlicht PIV
Keywords: bubbles, interface

Zusammenfassung

Die Haftbedingung an der Wand nach Prandtl gilt als eines der grundlegenden Axiome der Strömungsmechanik. Hiesige Untersuchungen [1] haben jedoch gezeigt, dass es Randbedingungen bei der Umströmung von Blasen in unterschiedlichen Medien gibt, bei denen die Haftbedingung an einer Blasengrenzfläche nicht erfüllt wird und somit auch die sich daraus ableitende Grenzschichttheorie in der klassischen Weise nicht anwendbar zu sein scheint.

Ziel der fortdauernden Untersuchungen besteht zunächst darin, das Geschwindigkeitsfeld um eine Gasblase in verschiedenen Medien mittels der Particle Image Velocimetry (PIV) zu ermitteln, um zu zeigen, dass tatsächlich unterschiedliche Geschwindigkeitsfelder für verschiedene Flüssigkeiten vorliegen. In einem weiteren Schritt, der nicht Gegenstand dieses Beitrages ist, soll dann eine mathematische Formulierung für Geschwindigkeitsfelder bei mobilen Grenzflächen gefunden werden.

Einleitung

Die Aufstiegs geschwindigkeit von Gasblasen in Flüssigkeiten und deren Grenzflächenverhalten ist zum Beispiel in der Verfahrenstechnik von Interesse für Vorgänge in Mischern oder Kolonnen. Aber auch im alltäglichen Leben begegnen einem derartige Phänomene, z.B. in Mineralwasserflaschen.

Bei dem Aufstieg einer Gasblase in einer Flüssigkeit handelt es sich um ein 2-Phasenproblem. Die Verbindung der beiden Phasen stellt die Grenzfläche da, deren Form letztlich durch die Laplacegleichung bestimmt wird (s. Clift et al. [2]). Erste Arbeiten auf dem Gebiet zur mathematischen Beschreibung wurden unabhängig von Hadamard [3] und Rybczynski [4] durchgeführt.

Zu erwarten wäre, dass eine derartige Betrachtungsweise immer zu einer eindeutigen Umströmung von Gasblasen führt und somit auch zu eindeutigen Aufstiegs- geschwindigkeiten. Verschiedene Untersuchungen (Duineveld [5], Peters [1], Fries [6]) haben aber gezeigt, dass Gasblasen die in Wasser aufsteigen unterschiedliche Aufstiegs- geschwindigkeiten aufweisen, was im Grenzfall dazu führt, dass Gasblasen in Wasser dieselbe Aufstiegs- geschwindigkeit haben, wie Kugeln aus einem Feststoff. Abb. 1 zeigt die dimensionslose Aufstiegs- geschwindigkeit über der Archimedeszahl. Eingetragen ist die Aufstiegs- geschwindigkeit einer Kugel (schwarze Linie) und dazu Messungen von Blasen und Tropfen, die in Wasser bzw. Silikonöl aufsteigen. Es zeigt sich, sobald Wasser eine der beiden Phasen bildet, dass die Aufstiegs- geschwindigkeit deutlich reduziert ist und sich ähnlich verhält, wie die einer Kugel. Wohin gegen Luftblasen in Silikonöl eine deutlich höhere Aufstiegs- geschwindigkeit haben.

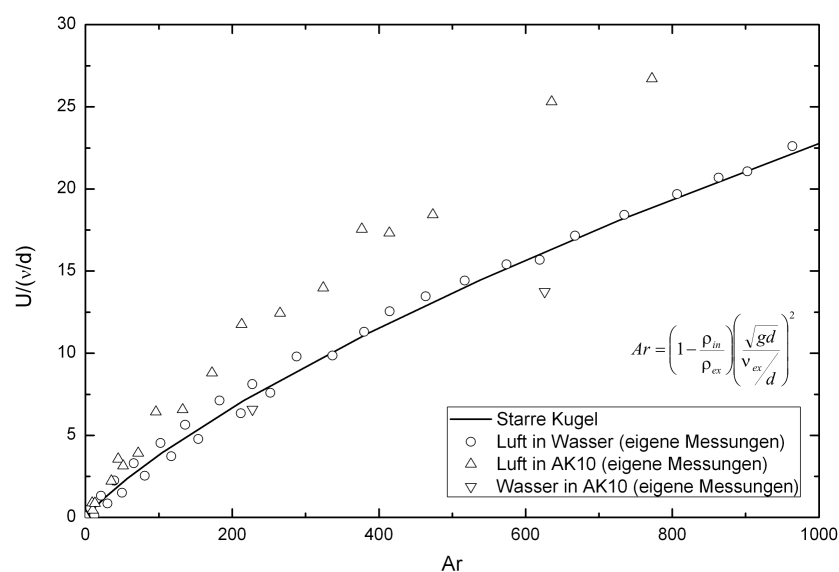


Abb. 1: Aufstiegs- geschwindigkeiten von Luftblasen in verschiedenen Umgebungs- medien

Dieses Verhalten zeigt sich allerdings ausschließlich wenn Wasser eine der beiden Phasen bildet. Vermutungen gehen dahin, dass sich im Wasser oberflächen- aktive Substanzen (Surfactants) an der Grenzfläche anlagern und diese so versteifen. Ein experimenteller Nachweis fehlt allerdings bisher. Fest zu halten bleibt, dass es zwei Arten von Grenzflächen zu geben scheint, die im folgenden mit mobil (bewegliche Oberfläche) und immobil (steife Oberfläche) bezeichnet werden sollen.

Die Konsequenz daraus ist, dass die Randbedingungen in beiden Fällen unterschiedlich sind und somit auch unterschiedliche Geschwindigkeitsfelder für die beiden Formen einer Grenzfläche zu erwarten sind. Bei der 17. Fachtagung der GALA [7] wurde dies bereits für den Fall einer festgehaltenen Blase und einer erzwungenen Umströmung gezeigt. Ziel ist es dies auch für frei aufsteigende Blasen zu zeigen.

Eine der ersten experimentellen Arbeiten zum Blasen- aufstieg wurde von Allen [8] durchgeführt. Gefolgt von weiteren Arbeiten z.B. von Haberman und Morten [9], Levich [10] oder Aybers und Tapucu [11]. Ermittelt wurden die Form der Blasen und die Aufstiegs- geschwindigkeit. Die Möglichkeit zur Ermittlung des Strömungs- feldes um die aufsteigende Blase bestand jedoch nicht, da zum einen die technische Entwicklung noch nicht soweit voran geschritten war,

zum anderen die Versuche in sog. Blasenaufstiegstanks durchgeführt wurden. Dabei werden die Blasen am unteren Ende des Tanks über eine Düse injiziert und steigen dann auf. Die Möglichkeit hierbei mittels PIV das Geschwindigkeitsfeld zu ermitteln sind sehr beschränkt bis unmöglich, da die Blase kontinuierlich ihre Position verändert.

Um diesen Nachteil zu umgehen, wurde eine Drehkammer entwickelt, die erstmals bei der 12. Fachtagung der GALA [1] vorgestellt wurde. Damit lassen sich Gasblasen in einem Fluid levitieren und können dann über einen deutlich längeren Zeitraum hinweg untersucht werden.

Experimenteller Aufbau und Messdurchführung

Der Versuchsstand besteht im wesentlichen aus drei Komponenten. Kernstück bildet die Drehkammer die auf zwei Walzen gelagert ist, von denen eine über ein Riemengetriebe mit einem stufenlos regelbarem Motor verbunden ist. Das System ist auf einer Verschiebeeinheit montiert, so dass die Kammer innerhalb einer Ebene verfahren werden kann. Der Verfahrweg wird durch ein lineares Wegmesssystem erfasst. Ein Hubzylinder hält die Kammer in ihrer Höhenposition. Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Aufbaus ist die CCD-Kamera (Imager pro X von LaVision) mit entsprechendem Objektiv (Makro-Planar T* 2,8/100mm). Für die Beleuchtung wird ein Nd:YAG Feststofflaser (Solo PIV III) verwendet, vor dessen optischem Ausgang ein optischer Diffusor montiert ist. Kamera und Laser befinden sich auf einer optischen Achse, da die Drehkammer über keinen seitlichen optischen Zugang verfügt. Somit handelt es sich bei dem Aufbau um ein Durchlicht PIV Verfahren. Die Anordnung, sowie einige Maße der Drehkammer sind in Abb. 2 dargestellt.

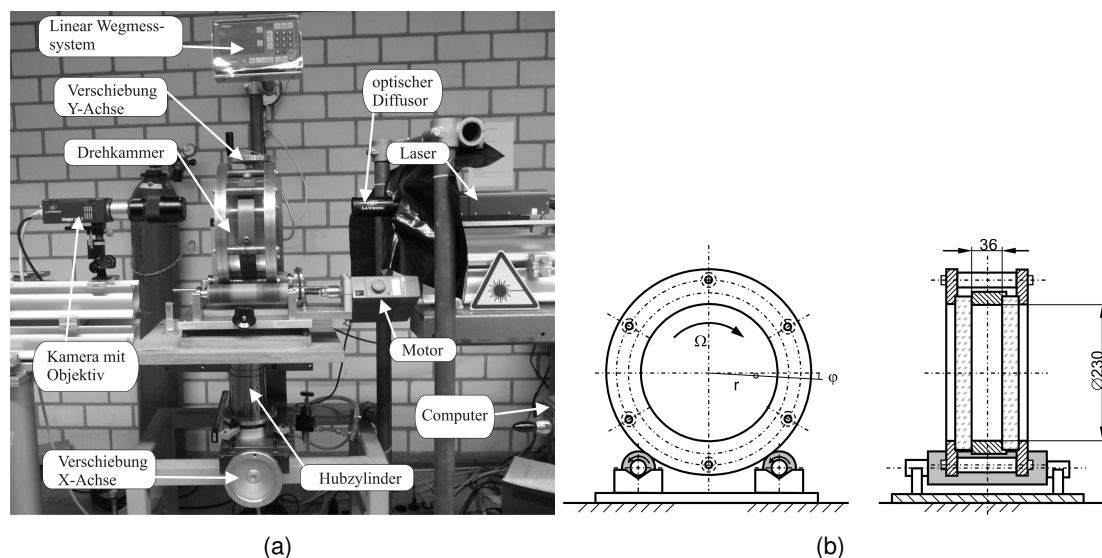


Abb. 2: Versuchsaufbau (a) und Dimensionen der Drehkammer (b)

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

Grenzfläche 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 abgebildet.

Die Kammer verfügt insgesamt über 3 verschließbare Öffnungen und wird komplett mit Silikonöl (AK10 von Wacker Chemie) gefüllt. Zum Einbringen einer Blase wird ein definiertes Volumen an Öl mit einer Spritze aus der Drehkammer entfernt.

Vor dem Einbringen einer Blase muss zunächst der Drehpunkt der Kammer gefunden werden und das gesamte System kalibriert werden. Zur Bestimmung des Drehpunkts wird eine Platte mit einem sehr kleinen Loch (Durchmesser etwa 1mm) in der Mitte in den Aussenring der Drehkammer eingesetzt, der der Kamera zugewandt ist. Danach wird die Kammer verfahren, bis das Loch im Aufnahmebereich der Kamera liegt. Anschliessend wird eine Aufnahme von dem Loch gemacht und die lineare Wegmessenheit auf Null gesetzt. Mittels eines in MatLab geschriebenen Programms, lässt sich der exakte Drehpunkt als Mittelpunkt des Lochs ermitteln.

Zur Bildererfassung und für die PIV Berechnungen wird die Software DaVis 7.2.2 von LaVision verwendet. Kalibriert wird das System mittels eines Stabes, dessen Durchmesser (5mm) bekannt ist, der durch eine Öffnung mittig in die Drehkammer eingeführt wird. Durch fotografieren des Stabes lässt sich so der Maßstab festlegen.

Nach dem Einbringen der Blase, wird die Drehkammer in Rotation versetzt (Kammerdrehzahl $\omega \approx 0,48\text{s}^{-1}$). Nach kurzer Anlaufzeit rotiert die Kammer samt Befüllung wie ein Festkörper. Auf Grund des sich einstellenden Kräftegleichgewichts, levitiert die Blase (zur theoretischen Grundlage siehe [[1]]) und positioniert sich in der Mitte der beiden Glasscheiben. Die Kamera muss auf diese Ebene scharf gestellt sein, was ebenfalls über den Kalibrierstab erreicht wird. Der sehr geringe Tiefenschärfebereich des Objektivs garantiert, dass nur Objekte in dieser Ebene scharf abgebildet werden.

In Abhängigkeit von Motordrehzahl und Position der Blase in der Kammer lässt sich Δt als zeitlicher Abstand zwischen den beiden Bildern eines Doppelbildes errechnen. Für die hier vorgestellten Ergebnisse ist $\Delta t = 174\mu\text{s}$. Pro Messung wurden 100 - 150 Doppelbilddaufnahmen gemacht. Als Tracer wurden dem Silikonöl Glashohlkugeln mit einem mittleren Durchmesser von $10\mu\text{m}$ zugegeben.

Bei bekannter Drehzahl des Motors kann die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb der Kammer in Abhängigkeit vom Radius an jeder Stelle berechnet werden. Mit der so berechenbaren Geschwindigkeitsverteilung kann die Qualität der Messung mittels PIV überprüft werden. In Abb. 3 ist die Geschwindigkeit über dem Radius aufgetragen. Die durchgezogene Linie stellt dabei die berechnete Geschwindigkeit in der Kammer dar, während die Messergebnisse durch schwarze Kreuze repräsentiert werden. Der gemessene Ausschnitt ist ca. $15 \times 15\text{mm}$ groß. Die Messung gibt dabei die theoretisch berechnete Geschwindigkeit sehr gut wieder, was auf eine verlässliche Messung schliessen lässt.

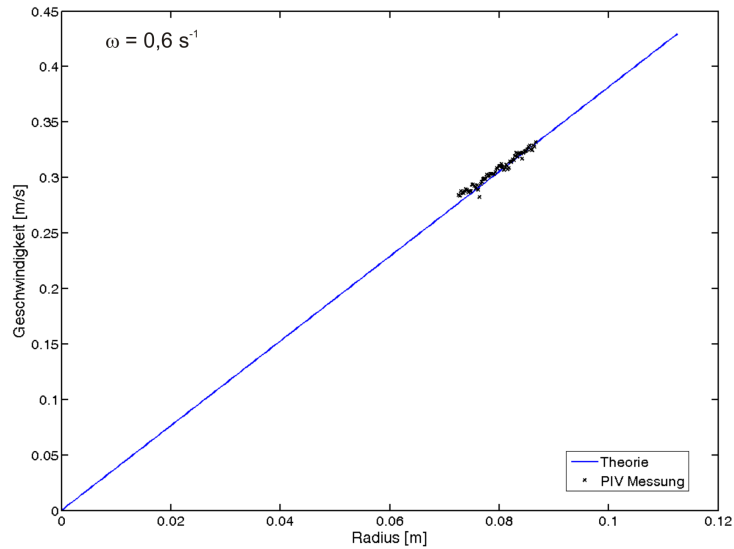


Abb. 3: Vergleich zwischen PIV-Messung und berechneter Drehgeschwindigkeit der Kammer

Auswertung

Um die exakte Position der Blase in der Drehkammer zu ermitteln, werden drei Informationen benötigt. Die Position des Kammerdrehpunkts auf dem Bild, der verfahrenene Weg (ablesbar über die linearen Wegmessenheit) und der Mittelpunkt der Blase. Abb. 4 verdeutlicht die Vorgehensweise. Der Vektor \vec{s} gibt die Verschiebung des Kameraausschnitts an, \vec{c} bestimmt den Abstand des Blasenmittelpunkts vom absoluten Nullpunkt, die Addition der beiden Vektoren liefert den Radius, auf dem die Blase stabilisiert ist.

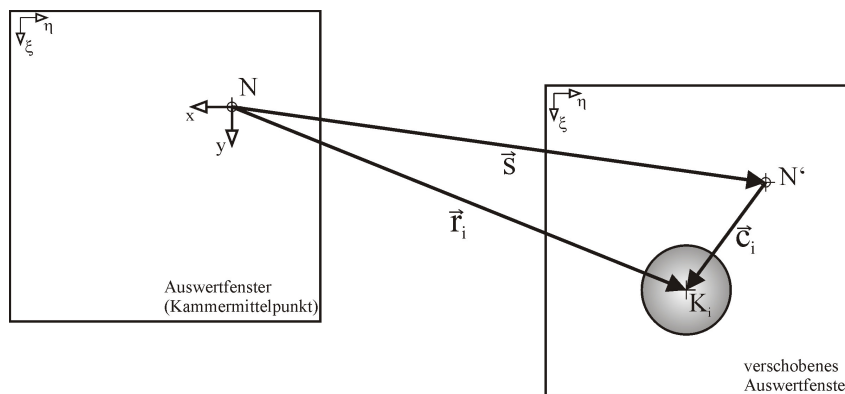


Abb. 4: Ermittlung des Radius, auf dem die Blase stabilisiert ist

Die PIV Auswertung erfolgt mit der Software DaVis 7.2.2. Als Startgröße des Auswertefensters wird, in Abhängigkeit der zu erwartenden maximalen Partikelverschiebung von etwa 5 Pixeln, 64×64 gewählt. Diese wird in fünf Durchläufen auf 12×12 reduziert. Nach Auswertung aller Doppelbildaufnahmen wird eine Mittelung durchgeführt.

Ergebnisse

Abb. 5 zeigt exemplarisch, wie die aufgenommenen Rohbilder aussehen. Gut zu erkennen ist die scharfe Abbildung der Blasen und die mittlere Tracerdichte.

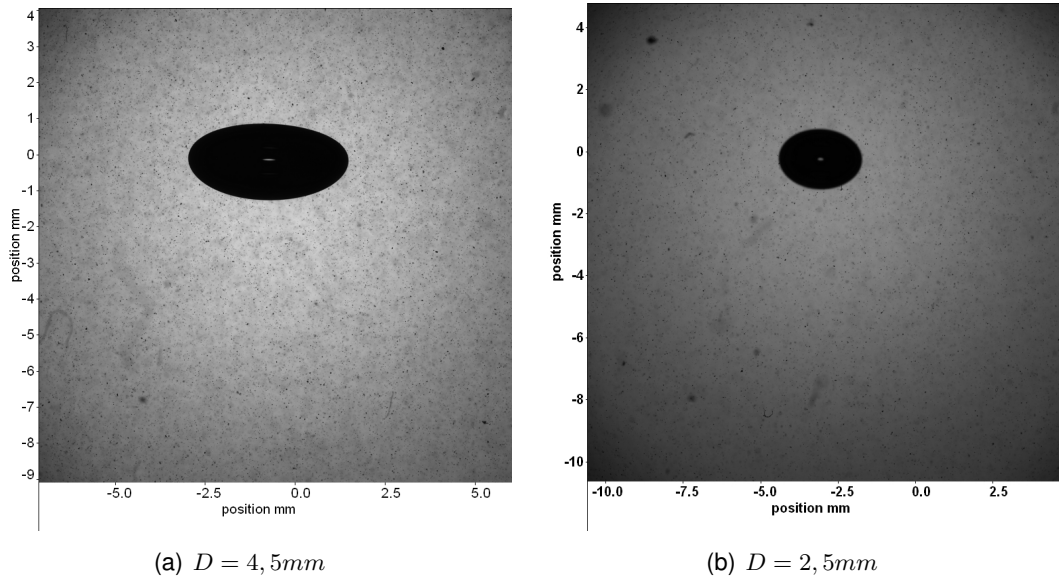


Abb. 5: Rohbild

Abb. 6 (a) zeigt zunächst die PIV Messung der Umströmung einer Styroporkugel. Sie dient als Referenzfall für die Umströmung einer Kugel mit bekannten Randbedingungen.

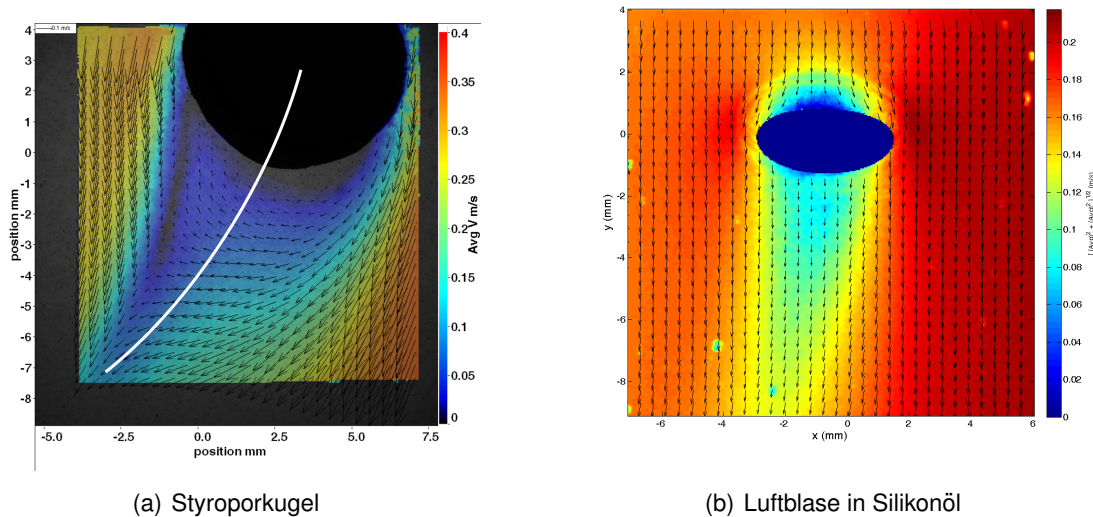


Abb. 6: Rohbild

Die Anströmung erfolgt im Bild von oben nach unten. Gut zu erkennen ist die asymmetrische Lage der Ablösepunkte und die starke Krümmung des Nachlaufs. Die zusätzlich eingezeichnete weiße Linie soll verdeutlichen, dass der Nachlauf deutlich stärker gekrümmt ist, als die Anströmung auf Grund ihrer Rotation. Die starke Krümmung lässt sich erklären durch die gra-

dientenbehaftete Anströmung innerhalb der Drehkammer, die eben zu einer asymmetrischen Ablösung führt. Dadurch bildet sich ein einseitig dominanter Ablösewirbel aus. Durch die Asymmetrie der Ablösung kommt es zur Verschiebung des Nachlaufs in Richtung der Drehkammermitte. Weiterhin ist gut zu erkennen, dass die Geschwindigkeit an der Grenzfläche kleiner wird und gegen Null strebt.

Die nebenstehende Abb. 6 (b) gibt die PIV-Messung einer umströmten Blase in Silikonöl wieder. Auch hier erfolgt die Anströmung im Bild von oben nach unten. Zu erkennen ist der sich ausbildende Staupunkt auf der Blasenvorderseite und ein Gebiet mit deutlich reduzierter Geschwindigkeit, bezogen auf die Anströmgeschwindigkeit, hinter der Blase. Im Vergleich zu Abb. 6 (a) ist allerdings festzustellen, dass dieses Nachlaufgebiet eine wesentlich geringere Krümmung aufweist. Es scheint eher der rotationsbedingten Krümmung der Strömung zu folgen. Außerdem ist keine Rezirkulation der Strömung hinter der Blase festzustellen. Offensichtlich löst die Strömung nicht wie bei der Kugel zu erwarten ab. Dieser Umstand wird gestützt durch die Tatsache, dass die Geschwindigkeit im Äquatorbereich der Blase (weiteste Stelle der Blase) keineswegs kleiner wird, oder gegen Null strebt.

Aus dem Vergleich der beiden Messungen lässt sich ableiten, dass die Umströmung einer Kugel bzw. einer Gasblase zu zwei verschiedenen Geschwindigkeitsfeldern führt, die sich insbesondere in ihrer Nachlaufcharakteristik deutlich voneinander unterscheiden, da insbesondere hier der Einfluss der Wandhaftung bzw. nicht Haftung eine entscheidende Rolle spielt.

Diskussion und Ausblick

Bei einer frei umströmten Blase mit mobiler Grenzfläche zeigt sich dieselbe Tendenz, wie sie bereits bei der festgehaltenen Blase mit mobiler Grenzfläche [7] festgestellt wurde. Die Geschwindigkeit geht nicht auf Null zurück. Der Nachlauf unterscheidet sich deutlich von dem der Kugel. Das Geschwindigkeitsfeld wird noch näher zu untersuchen sein. Ebenfalls steht noch die Untersuchung einer umströmten Blase in Wasser aus, um zu zeigen, dass hier die Geschwindigkeit sehr wohl an der Grenzfläche gegen Null strebt.

Für die Zukunft ist geplant, eine Drehkammer in Betrieb zu nehmen, die sowohl einen größeren Durchmesser, als auch einen größeren Abstand der Glasscheiben haben wird. Dadurch wird es zum einen möglich sein, Kugeln und Blasen mit einem größeren Durchmesser zu untersuchen. Zum Anderen wird der Hauptvorteil allerdings darin liegen, dass der Gradient der Anströmung bei Blasen auf großen Radienbahnen deutlich gleichmäßiger sein wird, als dies in der aktuell verwendeten Drehkammer der Fall ist und dadurch eine gleichmäßigere Anströmung gewährleistet werden kann.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen eines durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Projekts (Pe401/27-1).

Literatur

- [1] Peters F, Biermann S, Streulichuntersuchungen an einem kleinen, levitierten Bläschen. Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, GALA, 12. Fachtagung, Karlsruhe (2004)
- [2] Clift R, Grace JR, Weber ME, Bubbles, Drops and Particles. Academic Press Inc., New York (1978)

- [3] Hadamard J, Comp. Rend. Vol. 154 p. 1735 (1911)
- [4] Rybcynski W, Bull. Int. Acad. Sci. Cracovie (A) 40 (1911)
- [5] Duineveld PC, The rise velocity and shape of bubbles in pure water at high Reynolds number. J. Fluid Mech. 292, 325 - 332 (1995)
- [6] Fries N, Experimentelle Untersuchungen zum Aufstiegsverhalten kleiner fluider Kugeln in einer Drehkammer. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Ruhr-Universität Bochum (2006)
- [7] Gaertner B, Peters F, PIV-Untersuchungen zur Randbedingung an Blasengrenzflächen. Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, GALA, 17. Fachtagung, Erlangen (2009)
- [8] Allen HS, Phil. mag. Vol. 50 pp. 322/338, pp. 519/534 (1900)
- [9] Haberman WL, Morton RK, An experimental investigation of the drag and shape of air bubbles rising in various liquids. Rep. 802 (1953)
- [10] Levich VG, Physicochemical Hydrodynamics. Prentice-Hall, New York (1962)
- [11] Aybers NM, Tapucu A, Studies on the Drag and Shape of Gas Bubbles Rising through a Stagnant Liquid. Wärme- und Stoffübertragung Bd.2 S. 171 - 177 (1969)