

ZUM WANDEINFLUSS AUFSTEIGENDER BLASEN

WALL EFFECTS ON RISING BUBBLES

Marius Nüllig, Franz Peters*

Ruhr-Universität Bochum, Institut für Thermo- u. Fluidodynamik, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum

Gasblasen, Wandeinfluss, Diffusion

Gas bubbles, wall effects, diffusion

Einleitung

Der freie Aufstieg von Einzelblasen wurde von uns schon mehrfach beschrieben, z.B. [Peters, Biermann 2004] und [Peters, Els 2012]. Die dauerhafte Beobachtung der Blase wurde mit der Drehkammertechnik realisiert. Steigt die Blase in einer gezielt untersättigten Flüssigkeit auf, verkleinert sie sich mit der Zeit [Nüllig, Peters 2013a]. In unserem letzten GALA-Beitrag [Nüllig, Peters 2013b] untersuchten wir genau bekannte Referenzblasen mit Durchmessern von 0,5 bis 10mm in einer Drehkammer. Der Wandabstand der Drehkammer betrug 76mm. Es konnte gezeigt werden, dass Blasenvolumina auch bei komplexer Blasengeometrie und unregelmäßiger Bewegungsform optisch bestimmbar sind.

In dieser Arbeit wird der Blasenanstieg in einer Drehkammer mit 4,8mm Wandabstand untersucht. Durch Verringerung des Wandabstandes in die Größenordnung des Blasendurchmessers wird die Blase eingeeengt und von den Wänden beeinflusst. Durch Messung der Aufstiegs geschwindigkeit und einer Diffusionsrate wird untersucht wie sehr sich die Wände auf den Blasenanstieg auswirken. Zur Bestimmung der Blasengrößen beim Diffusionsvorgang wird vorher wieder eine Kalibration durchgeführt. Mit Hilfe dieser Kalibration wird zudem die Wasserfilmdicke zwischen Blase und Wänden abgeschätzt.

Experimenteller Aufbau

Der Versuchsaufbau entspricht im Wesentlichen dem aus [Nüllig, Peters 2013b]. Jedoch beträgt der Abstand der beiden Wände (Acrylglas) in der vorliegenden Arbeit statt 76mm jetzt 4,8mm. Die Kammer ist vollständig mit 0,351L Wasser gefüllt und hat einen Innendurchmesser von 305mm. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 1 dargestellt. Die Kammer wird durch einen frequenzgesteuerten Elektromotor mit konstanter Winkelgeschwindigkeit Ω gedreht. Eine der beiden Acrylglasplatten verfügt über eine zentrale Durchgangsbohrung. Über die Bohrung werden Stickstoffblasen in die anfangs stehende Drehkammer eingebracht. Die Kammer befindet sich dabei in der gleichen Position wie in Abb. 1 dargestellt. Die Blasen werden mit einer Kalibrationsspritze, die ebenfalls in [Nüllig, Peters 2013b] vorgestellt wurde, hergestellt. Das Blasenvolumen wird hierzu in einer Glaskapillare bekannten Innendurchmessers d_i aufgezogen.

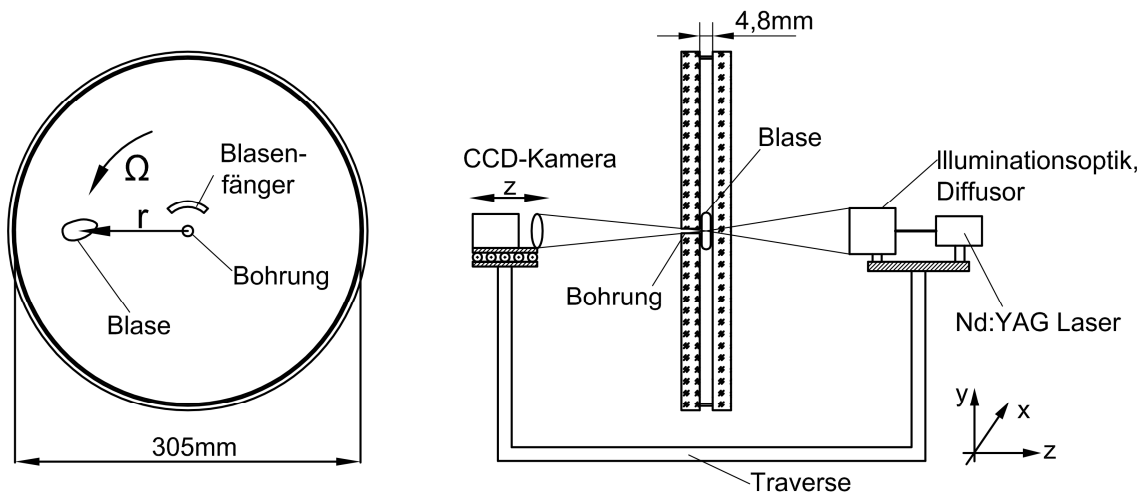


Abb. 1: Versuchsaufbau

Für die Bestimmung des Blasenvolumens wird dann nur noch die Blasenslänge in der Kapillare gemessen. Sehr große Blasenvolumen zerfallen beim Einbringen in mehrere kleine. Sie werden aber von einem oberhalb der Bohrung liegenden Blasenfänger aufgefangen und können sich dort wieder zu einer großen Einzelblase vereinen. Wird die Kammer anschließend in Drehung versetzt, dreht sich auch der Blasenfänger mit, sodass die Blase unter ihm abrollt und ihren Halt verliert. Nach einer kurzen Wartezeit levitiert die Blase in einem nahezu horizontalen Abstand r vom Drehkammermittelpunkt. Durch die weiterhin geöffnete Durchgangsbohrung bleibt der Kammerinnendruck atmosphärisch. Die Wassertemperatur beträgt in etwa 23-24°C. Die Blase wird mit einer CCD-Kamera (*Imager Pro X4M*, 2048x2048 mit Zeiss Macro Planar T*2,8/100) aufgenommen. Der Kamera genau gegenüber befindet sich zur Beleuchtung ein Diffusor, der von einem gepulsten Nd:YAG Laser (*Solo III, New Wave*) angeregt wird. Um die Blase anzuvisieren, können Kamera und Beleuchtungseinrichtung gleichzeitig mit einem Schrittmotor in x-y Richtung verschoben werden, da sie auf einer gemeinsamen Traverse montiert sind, siehe Abb. 1. Durch den Schrittmotor ist die Verschiebung der Kamera relativ zum Drehkammermittelpunkt genau zum Drehkammermittelpunkt bekannt. Für die Aufnahme der Blase wird die Software *DaVis 8.0 (Fa. LaVision)* verwendet. Kamera und Laser sind miteinander synchronisiert. Mit dem Kamerasystem werden Bilderserien in einer Frequenz von 11Hz aufgenommen.

Kalibration der Blasenvolumina

Es werden Stickstoffblasen im Durchmesserbereich d_e von 0,5mm bis ca. 8,4mm erzeugt. Das Wasser in der Drehkammer ist mit Hilfe einer Membrantechnik vollständig mit Stickstoff gesättigt [Nüllig, Peters 2013a], wodurch sich das Blasenvolumen über der Zeit nicht ändert. Von jeder Blase wird eine Serie von 100 bis 200 Bildern aufgenommen. Für jede Aufnahme der Serie wird die Projektionsfläche der Blase A_{proj} bestimmt. Die Projektionsfläche wird von der Blasenkontur eingeschlossen. Optik und Findung der Kontur wurden bereits in [Nüllig, Peters 2013b] besprochen. Abb. 2 zeigt exemplarisch einige Bilder von Blasen verschiedener Größe.

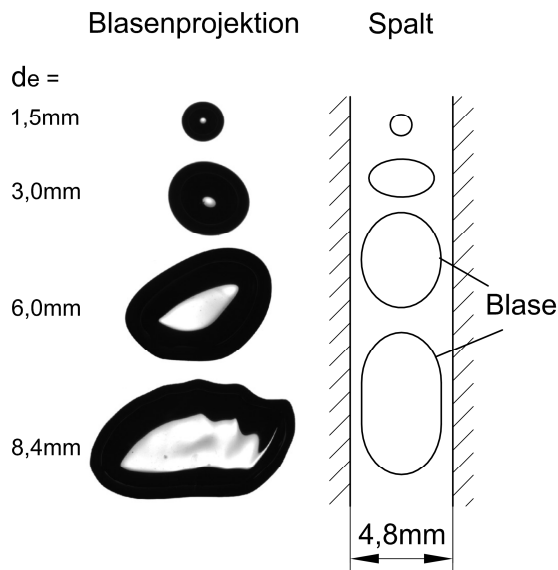


Abb. 2: Exemplarische Blasenbilder mit schematischer Seitenansicht in den Spalt (nicht maßstäblich)

Trägt man den Median der Projektionsflächen jeder Bildserie über den Referenzblasendurchmesser auf, ergibt sich für zwei unabhängig durchgeführte Messreihen der Verlauf in Abb. 3.

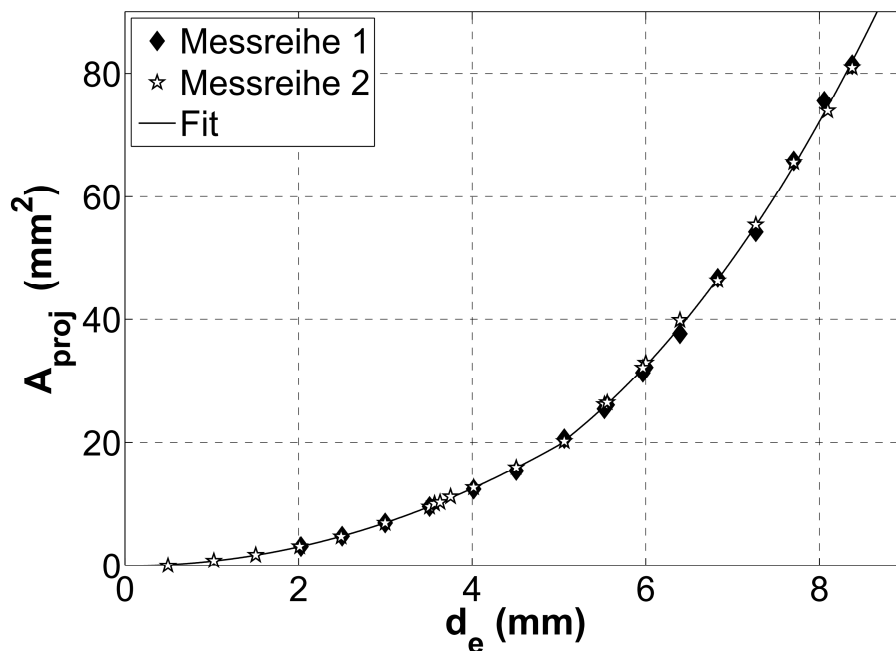


Abb. 3: Kalibration der Blasen volumina mit der Projektionsfläche

Legt man durch diese Mittelwerte einen Kurvenfit, so kann jedem d_e eindeutig ein A_{proj} zugeordnet werden. Bedeutender ist aber der umgekehrte Fall. So lässt sich mit dieser Zuordnung aus einer (gemittelten) Projektionsfläche der zugehörige Blasendurchmesser berechnen.

Durch den kleinen Abstand der Kammerwände wird eine große Blase stark gequetscht. Dadurch nähert sie sich der Form eines allgemeinen Zylinders mit der Grundfläche A_{proj} und der Höhe h_B . Abb. 4. zeigt eine solche Blase bei der Spaltweite h_S in Seitenansicht. Das zugehörige genäherte Zylindervolumen ist gestrichelt dargestellt.

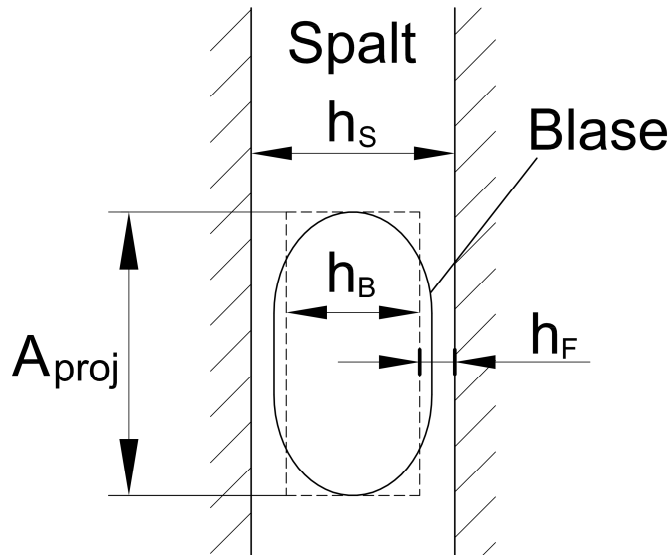


Abb. 4: Seitenansicht der Blase im Spalt
Gestrichelte Linie: Näherung der Blase als Zylinder

Setzt man dieses Zylindervolumen dem Volumen der sphärischen Referenzblase gleich, so ergibt sich ein Zusammenhang zwischen A_{proj} und d_e :

$$A_{proj} = \frac{1}{6} d_e^3 \pi / h_B. \quad (1)$$

Trägt man die Daten aus Abb. 3 in ein Diagramm mit d_e^3 auf der Abszisse ein (Abb. 5), so sieht man, dass sich die Messpunkte beider Messreihen einer Geraden nähern.

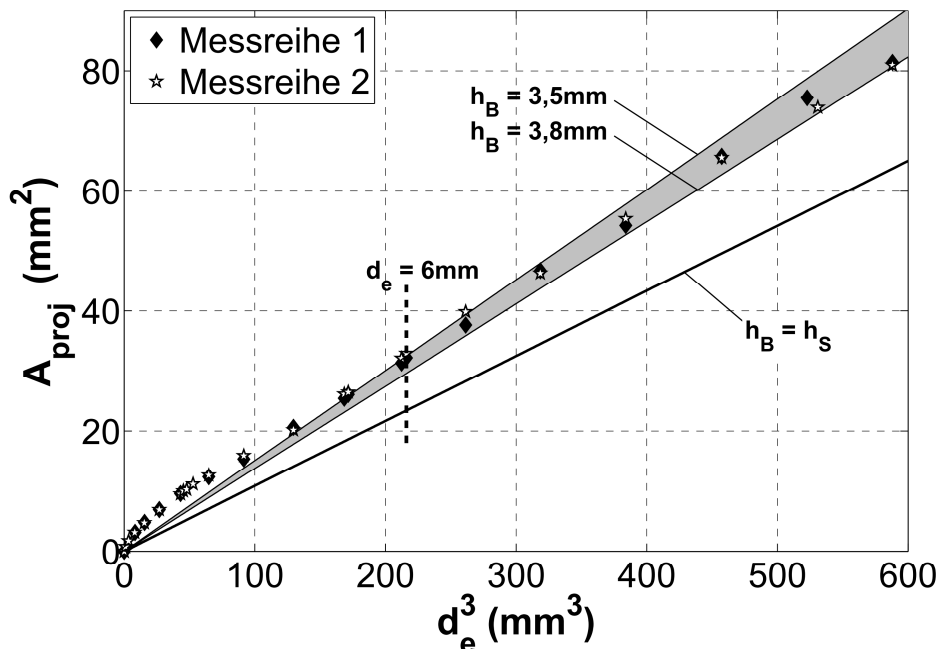


Abb. 5: Abschätzung der mittleren Blasenhöhe h_B

Ab einer Blasengröße von 6mm liegen die Messpunkte innerhalb einer grau eingezeichneten Fläche. Die Fläche wird von zwei Geraden (berechnet nach Gl. (1)) begrenzt und kennzeichnet den Bereich, in dem der Schätzwert für h_B über 3,5mm und unter 3,8mm liegt. Zusätzlich ist die Gerade eingezeichnet, die sich ergeben würde, wenn h_B genau gleich der

Kammerbreite $h_S = 4,8\text{mm}$ wäre. Mit den beiden Schätzwerten von h_B ermittelt man eine mittlere Filmdicke

$$h_F = \frac{h_S - h_B}{2} \quad (2)$$

zwischen $0,5\text{mm}$ und $0,65\text{mm}$.

Ergebnisse

In Abb. 6 sind die Geschwindigkeitsdaten aus dieser Arbeit zusammen mit Daten des freien Blasenauftriebs aufgetragen. Für den $4,8\text{mm}$ Wandabstand beinhaltet das Diagramm die Aufstiegsgeschwindigkeiten der Referenzblasen aus obiger Kalibration und aller Blasen der noch im Folgenden erläuterten Diffusionsmessung. Dazu kommen zwei weitere Drehkammerdatensätze: Einer mit einem Wandabstand von 36mm [Biermann, Peters 2005] und ein aktueller mit 76mm Wandabstand. Die Aufstiegsgeschwindigkeiten oszillierender Blasen wurden gemittelt. Hinzu kommen die Aufstiegsgeschwindigkeiten aus einer Blasen säule [Peters, Els 2012], die in schnell (mobile Grenzfläche) und langsam (immobile Grenzfläche) unterteilt sind.

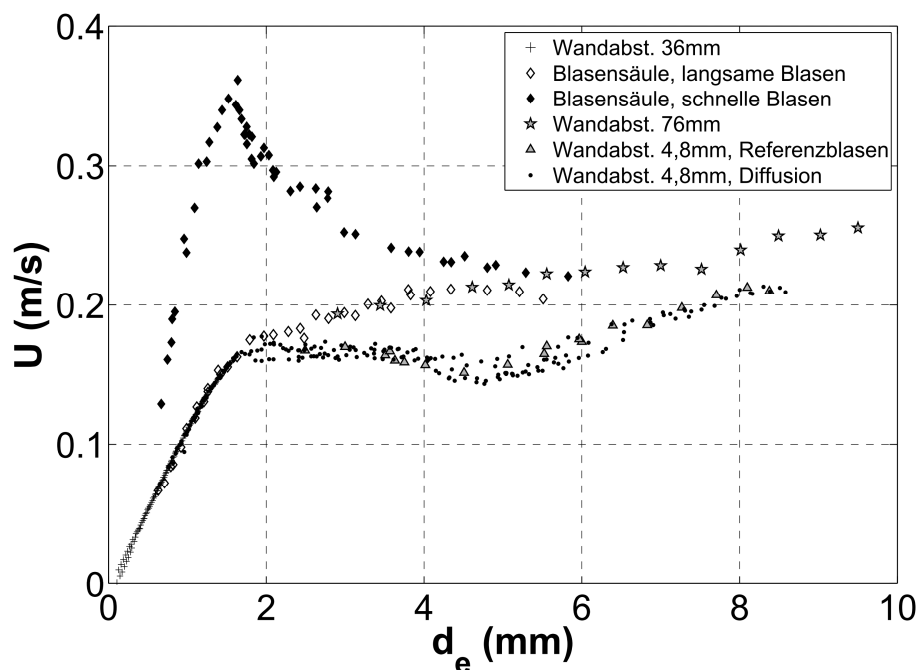


Abb. 6: Aufstiegsgeschwindigkeiten vs. Blasendurchmesser

Der erste Wandeinfluss auf die Geschwindigkeit findet bei ca. 2mm Blasendurchmesser statt. Ab dieser Größe bildet sich ein bis 4mm reichendes Geschwindigkeitsplateau aus, das deutlich unter dem Niveau der "frei aufsteigenden" Blasen liegt. Im Größenbereich von 4 bis 5mm gibt es einen Übergangsbereich, in welchem sich die Geschwindigkeit auffächert. Ab etwa 5mm , also in der Größe des Wandabstandes, ist dann ein kontinuierlicher Geschwindigkeitsanstieg zu bemerken. Dieses Verhalten wird auf eine Mobilisierung der Blasenoberfläche durch hohe Geschwindigkeitsgradienten zurückgeführt. Der steile Geschwindigkeitsanstieg, steiler als in der weiten Kammer, unterstützt diese Interpretation. Blasen größer als $8,4\text{mm}$ konnten nicht erfolgreich vermessen werden, da sie sich häufig während des Aufstiegs in mehrere kleinere Blasen zerlegten.

Für die Messung des Diffusionsvorgangs wird das Wasser zu 40% mit Stickstoff gesättigt, alle anderen Gase werden entfernt (zur Technik siehe [Nüllig, Peters 2013a]). Die eingebrachte Stickstoffblase verkleinert sich durch die Untersättigung sukzessiv. Von der diffundierenden Blase werden mehrere Messpunkte mit je 100 bis 200 Bildern aufgenommen. Mit dem Median von A_{proj} jedes Messpunktes und dem Fit aus Abb. 3 wird dann der Blasendurchmesser berechnet. Der Verlauf der Durchmesser-Verkleinerung ist in Abb. 7 über der Zeit aufgetragen.

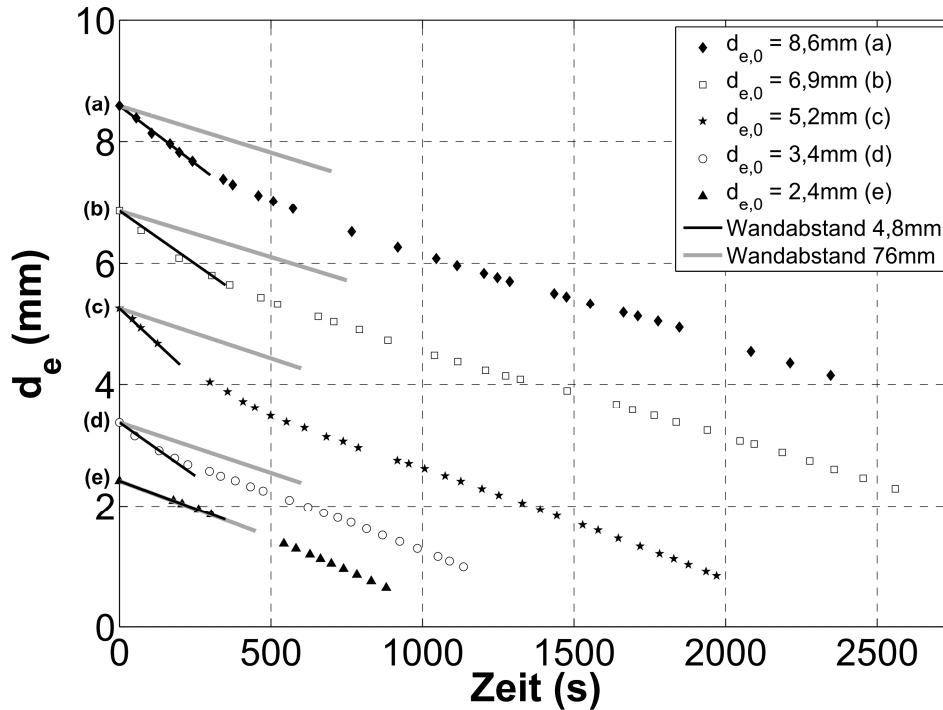


Abb. 7: Verkleinerung der Stickstoffblasen über der Zeit in Wasser
Sättigung N_2 im Wasser: 40%

Die fünf Fälle unterscheiden sich durch unterschiedliche Startdurchmesser. Kurz nach Start ändern sich die Durchmesser (a) bis (d) stark. Anschließend flacht ihr Durchmesser-Verlauf auf ein nahezu lineares Niveau ab. Zur Bewertung des Diffusionsvorgangs kann nur der Anfang der Messreihen herangezogen werden, weil die Wassermenge, in die die Blase diffundiert, aufgrund der Kammerenge sehr gering ist, so dass es rasch zu einer Aufsättigung kommt. Die Änderungsraten werden mit einer Ausgleichsgeraden durch die ersten Datenpunkte berechnet. Sie sind in Tab. 1 ($R = \frac{1}{2}d_e$). aufgelistet und in Abb. 7 eingetragen.

Tab. 1: Vergleich der Blasenverkleinerungsraten bei 4,8mm und 76mm Wandabstand
Sättigung des Wassers mit N_2 : 40%

Startdurchmesser $d_{e,0}$ [mm]	Wandabstand	Wandabstand*
	4,8mm $dR/dt (t=0s)$ [$\mu m/s$]	76mm dR/dt [$\mu m/s$]
8,6	(a) 1,88	0,76
6,9	(b) 1,74	0,76
5,2	(c) 2,31	0,82
3,4	(d) 1,73	0,82
2,4	(e) 0,91	0,92

*Aktuelle Vergleichsmessung

Der Einfluss des Wandabstandes wird überaus deutlich. Die eingeengte Blase diffundiert bis zu 2,8-mal so schnell wie die Referenzblase in der weiten Drehkammer einer aktuellen Vergleichsmessung. Der Einfluss der Wände beginnt, wenn die Blase etwa halb so groß ist wie der Wandabstand.

Fazit

Die zwischen den eng stehenden Wänden einer Drehkammer in Wasser aufsteigenden Blasen verhalten sich deutlich anders als die Referenzblasen in einer weiten Kammer. Die Aufstiegs geschwindigkeit wird bereits reduziert, wenn der Blasendurchmesser geringer als die halbe Kammerweite ist. Die Diffusionsrate erhöht sich drastisch, wenn die Blase größer als die halbe Kammerweite wird. Der zwischen Blase und Kammerwand verbleibende Wasserfilm wird zu 0,5mm bis 0,65mm abgeschätzt.

Die Ergebnisse liefern einen Startpunkt zu weiteren Analysen. Eindeutige Erklärungen des beobachteten Verhaltens stehen aus.

Dankesworte

Die Autoren danken dem *Mercator Research Center Ruhr* für die Unterstützung dieses Projekts.

Literatur

Peters, F., Biermann, S., 2004: "Streulichtuntersuchungen an einem kleinen levitierten Bläschen", 12. Fachtagung der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie, Karlsruhe

Peters, F., Els, C., 2012: "An experimental study on slow and fast bubbles in tap water", *Chemical Engineering Science*, 82: 194-199, doi: 10.1016/j.ces.2012.06.061

Nüllig, M., Peters, F., 2013a: "Diffusion of Small Gas Bubbles into Liquid Studied by the Rotary Chamber Technique", *Chemie Ingenieur Technik*, 85: 1074-1079, doi: 10.1002/cite.201200196

Nüllig, M., Peters, F., 2013b: "Das Volumen oszillierender Gasblasen bei Diffusionsversuchen", 21. Fachtagung der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie, München

Biermann, S., Peters, F., 2005: "Die Deformation kleiner, aufsteigender Bläschen", 13. Fachtagung der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie, Cottbus