

Diffusionsverhalten einer Dreier-Blasengruppe in der Drehkammer

Diffusion of a bubble triplet in the rotary chamber

Marius Nüllig, Franz Peters

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

Gasblasen, Blasengruppe, Diffusion
Gas bubbles, bubble group, diffusion

Einleitung

In [Nüllig, Peters, 2014] wurde der Einfluss von Wänden auf das Diffusions- und Aufstiegsverhalten von Stickstoffblasen mit der Drehkammertechnik untersucht. Die Blasen wurden dort in untersättigtes Wasser bei nur geringem Wandabstand eingebracht und mit einer CCD-Kamera aufgenommen. Da Ergebnisse aus Untersuchungen ohne Wandeinfluss zur Verfügung standen, wurde der Wandeinfluss gut erkennbar. Daraus stellte sich die Frage, ob sich Blasen auch gegenseitig beeinflussen, wenn man mehrere davon nahe aneinander bringt. Die Ergebnisse könnten dazu dienen die Stoffaustauschvorgänge in Blasensäulen besser zu verstehen, wo Blasen in großen dichtgepackten Schwärmen nebeneinander aufsteigen. Die Drehkammertechnik ist ein geeignetes Mittel Blasen in gegenseitige Nähe zu bringen. Dazu wird ausgenutzt, dass gleiche Blasen an die gleiche radiale Position drängen [Peters, Biermann, 2004]. Die Blasen interagieren dadurch, was an deren Bewegungsverhalten sichtbar wird.

In dieser Arbeit wird als ein erster Schritt eine kleine Blasengruppe mit drei Stickstoffblasen betrachtet. Dazu wird eine Drehkammer mit großem Wandabstand verwendet, sodass ausreichend Bewegungsraum für die Gruppe zur Verfügung steht. Die Drehkammer ist vollständig mit Wasser gefüllt, das zu 40% mit Stickstoff gesättigt ist. Der Stickstoff aus der Blase diffundiert dadurch in die Flüssigkeit und es kommt zu einer stetigen Blasenverkleinerung. Diese Verkleinerung führt wiederum direkt zu einer Änderung der Aufstiegs geschwindigkeit. Es wird untersucht, ob die Gruppe Einfluss auf die Diffusionsrate und die Aufstiegs geschwindigkeit hat. Die Ergebnisse werden dazu mit Messungen an Einzelblasen [Nüllig, Peters, 2016] verglichen. Für diesen Vergleich werden die drei Blasendurchmesser in einen gemeinsamen mittleren Durchmesser umgerechnet. Neben Diffusionsrate und Aufstiegs geschwindigkeit stehen Angaben über das Bewegungsverhalten der Blasen zur Verfügung.

Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Aufbau ist mit dem aus [Nüllig, Peters, 2013a + 2013b] identisch und in Abb. 1 mit eingebrachter 3er Stickstoff-Blasengruppe dargestellt. Jede der Blasen hat anfangs einen Durchmesser von $d_e=2,95\text{mm}$. Die Drehkammer ist vollständig mit Wasser gefüllt, das zu 40% mit Stickstoff gesättigt ist ($\chi=0,4$). χ ist gleichzusetzen mit dem Verhältnis der Partialdichten ρ_∞/ρ_s , wobei ρ_∞ die Partialdichte des Stickstoffes in der Flüssigkeit ist und ρ_s die bei vollständiger Sättigung (1atm). Die gezielte Sättigung des Wassers mit einem bestimmten χ wird mit dem Verfahren aus [Nüllig, Peters, 2013a] durchgeführt. Die Blasen werden alle zusammen in die rotierende Kammer über eine zentrale Bohrung in der vorderen Drehkammerplatte eingebracht.

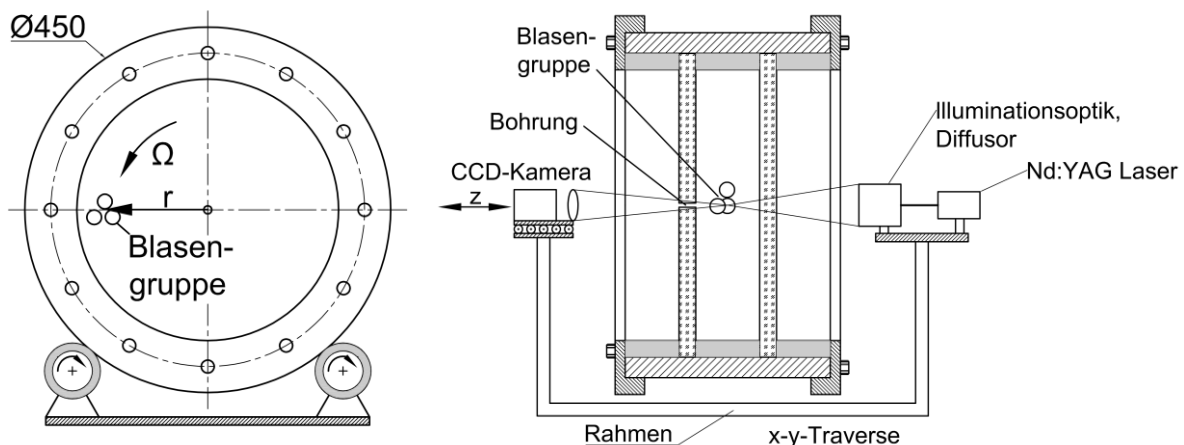


Abb. 1: Versuchsaufbau.

Für das Einbringen wird die Transportspritze in Abb. 2 verwendet. Zuvor werden die Blasen nacheinander in diese, wie dargestellt, mit der Kalibrationsspritze (siehe [Nüllig, Peters, 2013a + 2013b]) eingefüllt. Mit der Kalibrationsspritze werden die Blasen präzise auf die gleiche Anfangsgröße gebracht. Die Transportspritze ist vom Prinzip her genauso aufgebaut wie die Kalibrationsspritze, sie ist nur etwas größer dimensioniert. Die größeren Abmessungen ermöglichen es die Blasen komfortabel aufzunehmen und nachher gleichzeitig auszustoßen. Beide Spritzen werden zuvor mit gesättigtem Wasser ($\chi=1$) gefüllt.

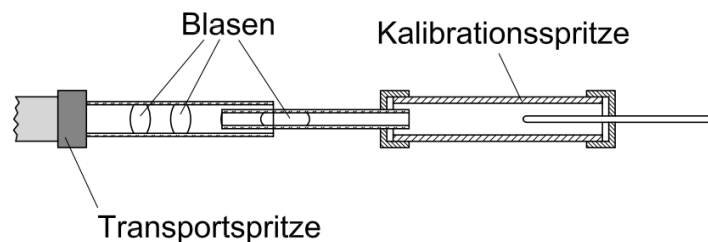
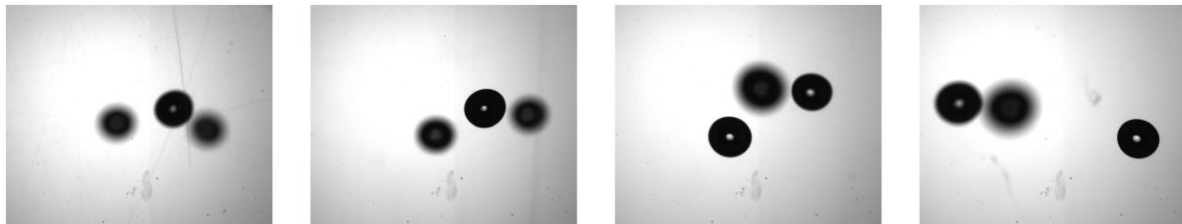


Abb. 2: Übergabe der Blasen an die Transportspritze.

Nach dem Einbringen in die Kammer benötigen die Blasen etwas Zeit bis sie sich so nahe kommen, dass erste Wechselwirkungen sichtbar werden. In dieser Zeit verkleinern sie sich bereits ein wenig durch Diffusion des Gases in Flüssigkeit. Die Blasen ziehen sich dann rasch immer mehr zusammen und gegenseitige Störungen nehmen zu. Störungen können z.B. Kollisionen oder sichtbare Zuckungen sein, die durch das Durchlaufen einer Blase durch den Nachlauf einer anderen verursacht werden. Mit Beginn dieser Störungen wird die

Aufnahme der Blasen über der Zeit begonnen. Es kann allerdings nicht gewährleistet werden, dass diese immer genau in einer gemeinsamen Schärfeebene liegen. Für die Messung der Blasenverkleinerung werden aber scharfe Aufnahmen von allen drei Blasen an möglichst allen Messpunkten benötigt. Es wird daher der Serienbildmodus der Kamera verwendet. Die Kamera nimmt dann Bilder mit einer Frequenz von 11Hz auf und wird so in z-Richtung verfahren, dass die Schärfeebene das Innere der Kammer einmal von vorne bis hinten durchfährt. Abb. 3 verdeutlicht den Aufnahmeprozess exemplarisch. Zunächst sind in (a) alle drei Blasen unscharf abgebildet. Nach Durchfahren der z-Achse gibt es in der aufgenommenen Bildserie fast immer von jeder Blase eine scharfe Aufnahme (b)-(d).



(a) Blasen unscharf. (b) Blase 1 scharf. (c) Blase 2 scharf. (d) Blase 3 scharf.

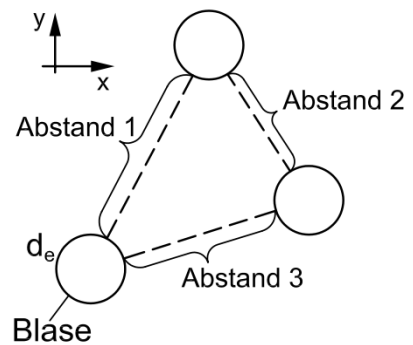
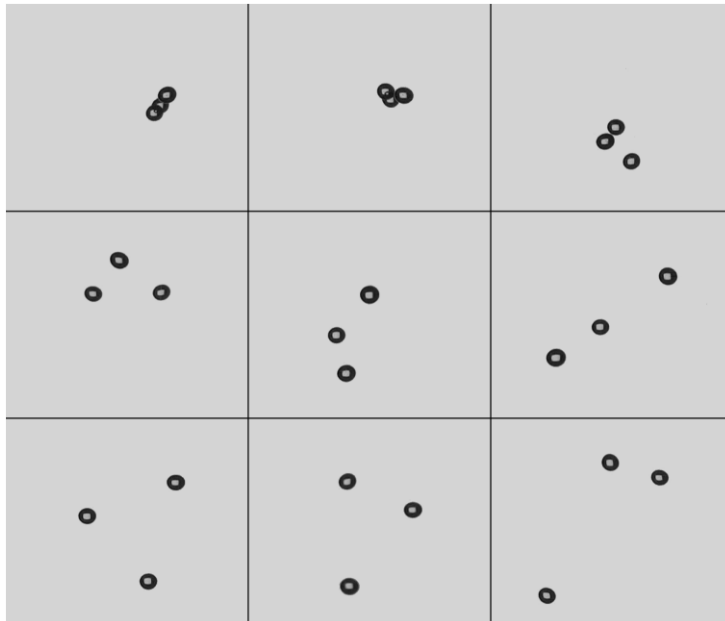
Abb. 3: Durchfahren der Drehkammer mit der Schärfeebene.

Dieses Procedere wird über mehrere Zeitpunkte wiederholt. Am Ende der Messung werden zu jedem Messpunkt die drei scharfen Blasenbilder herausgesucht. Aus jedem Bild wird die jeweils scharfe Blase mit einem MATLAB-Tool ausgeschnitten und dann der Blasenvolumenbestimmung [Nüllig, Peters, 2013b] zugeführt. Die daraus erhaltenen drei Blasen volumina werden jeweils erst in d_e umgerechnet, diese dann addiert und durch 3 geteilt. Durch die Mittelung der Durchmesser können die Ergebnisse mit denen der Einzelblasen [Nüllig, Peters, 2016] verglichen werden. d_e bleibt weiter als Bezeichnung für den gemittelten Durchmesser erhalten. Alle Messpunkte zusammen ergeben den Verlauf $d_e(t)$. Bis auf wenige Ausnahmefälle verkleinern sich die drei Blasen nahezu einheitlich schnell, d.h. die drei Durchmesser weichen voneinander nur kaum bis gar nicht ab. Unterschiedliche Verkleinerungsgeschwindigkeiten können verschiedene Ursachen haben, die nicht unbedingt auf das Experiment zurückzuführen sind, z.B. Verschmutzungen.

Durch die Verkleinerung wandert die ganze Gruppe mit der Zeit auch immer mehr in Richtung Drehkammermitte. Wegen $U=\Omega r$ verkleinert sich dadurch ebenfalls deren Aufstiegsgeschwindigkeit U . Ω ist die Winkelgeschwindigkeit der Kammer und beträgt ca. 1,9 rad/s. Für den Radius r werden die x-y Koordinaten des Punktes verwendet, auf den die Blasen immer wieder zustreben oder diesen umkreisen. Diese Punkte aus der gesamten Messung werden durch Sichtung aller Serien durch grobes Anvisieren gewonnen und anschließend notiert.

Bewegungsverhalten der Blasengruppe

Das Bewegungsverhalten einer Blasengruppe ist exemplarisch in Abb. 4a dargestellt. Die drei Blasen haben einen Durchmesser d_e von je 2,95mm. Die oberste Zeile zeigt wie sehr nahe sich die Blasen kommen können. Es kommt zu Kollisionen und starken sichtbaren gegenseitigen Störungen. Zu Koaleszenz ist es nur sehr selten gekommen, die nicht weiter betrachtet wird.



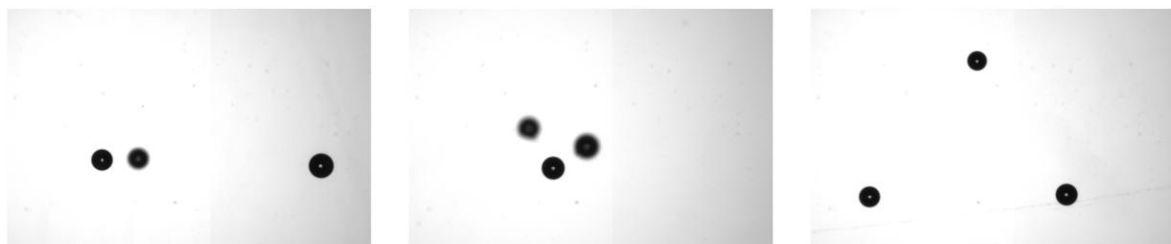
(b) Skizze zu den Blasenabständen.

(a) Typische Aufnahmen der Blasenbewegung.
 d_e jeder Blase: 2,95mm

Abb. 4: Blasenbewegungen und -abstände.

Die unterste Zeile zeigt Blasen mit relativ großem Abstand von etwa 4-7 Blasendurchmessern, womit die Distanz zwischen den Blasenoberflächen gemeint ist, wie Abb. 4b skizziert. Die mittlere Zeile in Abb. 4a zeigt den am häufigsten aufgetretenen Fall mit ca. 2-3 Blasendurchmessern Abstand. Wie sich bei der Aufnahme des Diffusionsvorgangs gezeigt hat, können die Angaben über die Abstände auch näherungsweise auch auf kleinere Blasen angewandt werden.

Ganz am Ende der Diffusionsmessungen sind drei Möglichkeiten aufgetreten, wie sich die Blasen in der Strömung positioniert haben (siehe Abb. 5).



(a) Radiale Positionierung. (b) Axiale Positionierung. (c) Fortwährende Beeinflussung.

Abb. 5: Positionierung der Blasen in der Drehkammer zum Ende der Diffusionsmessung, d_e der Blasen je $\sim 0,6$ mm.

Eine radiale Positionierung (Abb. 5a) ist dann aufgetreten, wenn die drei Blasendurchmesser am Ende der Messung leicht unterschiedlich groß waren. Bei gleich großen Blasen ergaben sich die Möglichkeiten der axialen Positionierung (Abb. 5b) und der fortwährenden Beeinflussung (Abb. 5c). Bei fortwährender Beeinflussung drehten sich die Blasen konstant wie in einer Ebene um einen mittleren Punkt und nahmen dabei eine Dreiecksformation an. Eine untere Blase durchlief dabei immer wieder den Nachlauf einer oberen.

Ergebnisse

Der Verlauf der Aufstiegs­geschwindigkeit über den gemittelten Durchmesser d_e ist in Abb. 6 aufgetragen.

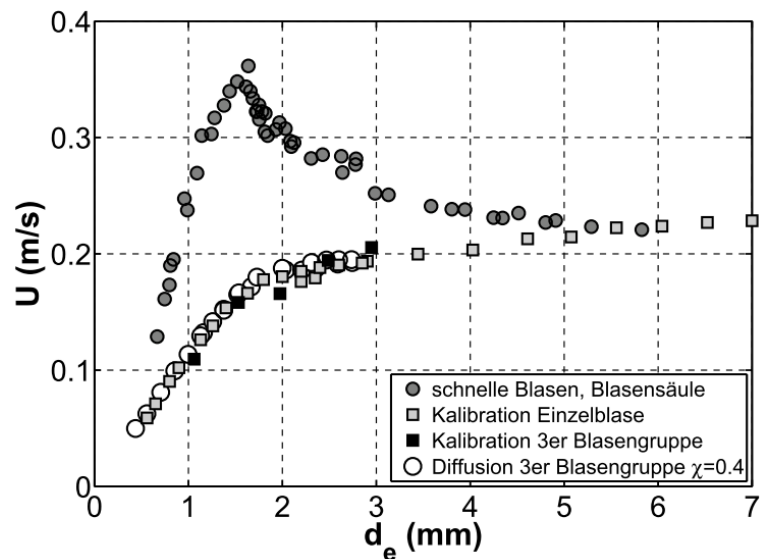


Abb. 6: Aufstiegs­geschwindigkeit U der Blasengruppe über den Blasendurchmesser d_e im Vergleich mit Einzelblasen.

Für Blasengruppen sind zwei Datensätze vorhanden, einer aus den Diffusionsmessungen bei $\chi = 0,4$ und ein anderer aus einer vorherigen Kalibrierung ohne Diffusion ($\chi = 1$). Zum Vergleich ist ebenfalls ein Datensatz einer Kalibrierung von Einzelblasen vorhanden [Nüllig, Peters, 2016]. Man erkennt, dass die Daten von Einzelblase und Blasengruppe recht gut zusammenfallen. Es gibt also keine sichtbare Auswirkung der Blasengruppe auf die Aufstiegs­geschwindigkeit. Der zusätzlich eingetragene Datensatz schneller Blasen [Peters, Els, 2012] liegt oberhalb der aktuellen Messung und hat zwei Funktionen. Er zeigt erstens, dass nur langsame Blasen mit immobilier Blasenoberfläche gemessen wurden und dient zweitens als optische Referenzlinie.

Abb. 7 zeigt den Verlauf des gemittelten Blasendurchmessers der Gruppe über der Zeit. Für das mit $\chi = 0,4$ gesättigte Wasser sind drei Verläufe $d_e(t)$ eingetragen.

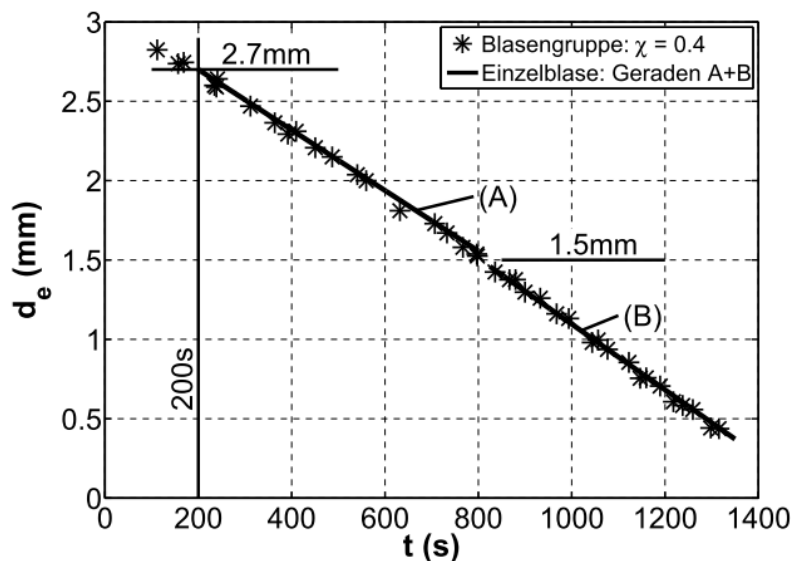


Abb. 7: Verlauf des Blasendurchmessers d_e über der Zeit t .

Diese sind aber kaum einzeln identifizierbar, da sie nahezu ineinander verlaufen. Der gemeinsame Anfangspunkt (200s | 2,7mm) wurde durch horizontale Verschiebung der drei Verläufe erreicht und dient der besseren Vergleichbarkeit. Außerdem befinden sich zwei Geraden A und B im Diagramm. Diese repräsentieren den Durchmessererlauf einer Einzelblase bei sonst gleichen Bedingungen. Die Steigungen der Geraden, angegeben als $|dR/dt|$ ($d_e = 2R$), stammen aus [Nüllig, Peters, 2016]. Gerade A bezieht sich auf einen anderen Durchmesserbereich als Gerade B, siehe Tab. 1. Die $|dR/dt|$ der Blasengruppe in den beiden Durchmesserbereichen sind ebenfalls angegeben und wurden durch lineare Regression der Datenpunkte ermittelt.

Tab. 1: Vergleich der Blasenverkleinerungsraten $|dR/dt|$ von Einzelblase und Blasengruppe bei $\chi = 0,4$.

Durchmesserbereich d_e (mm)	Einzelblase $ dR/dt $ ($\mu\text{m/s}$)	Blasengruppe $ dR/dt $ ($\mu\text{m/s}$)
3,0 → 1,5	0,95 (A)	0,95
1,5 → 0,3	1,04 (B)	1,04

Zum einen wird mit den Daten gezeigt, dass kleinere Blasen ein etwas höheres $|dR/dt|$ haben als größere. Zum anderen stimmen $|dR/dt|$ von Einzelblase und Blasengruppe in den d_e -Bereichen genau miteinander übereinstimmen. Daraus kann geschlossen werden, dass die Blasengruppe kein signifikanter Einfluss auf die Diffusion ausübt.

Zusammenfassung

Es wurde die Frage gestellt, ob sich Blasen gegenseitig bzgl. der Aufstiegsgeschwindigkeit und Diffusion beeinflussen, wenn diese nahe beieinander aufsteigen. Die Drehkammertechnik ermöglicht es gegenseitige Nähe gleicher Blasen herzustellen. Es werden drei Blasen mit einem Durchmesser von je 2,95mm zusammen in das zu 40% gesättigte Wasser der Drehkammer eingebracht. Dadurch verkleinern sie sich stetig und die gesamte Gruppe wandert über der Zeit immer mehr in Richtung Kammert Mittelpunkt. Das Volumen aller Blasen und die Gruppenaufstiegsgeschwindigkeit werden über der Zeit aufgenommen. Die drei Blasenvolumina werden zu einem mittleren Durchmesser umgerechnet, damit ein Vergleich zu Messungen der Einzelblase möglich ist. Es zeigt sich, dass es zu keiner Beeinflussung der Aufstiegsgeschwindigkeit und Diffusion durch die Blasengruppe kommt.

Literatur

- Nüllig, M., Peters, F., 2014** "Zum Wandeinfluss aufsteigender Blasen", 22. Fachtagung der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie, Karlsruhe
- Peters, F., Biermann, S., 2004**: "Streulichtuntersuchungen an einem kleinen levitierten Bläschen", 12. Fachtagung der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie, Karlsruhe
- Nüllig, M., Peters, F., 2016**: "Diffusion of Large Nitrogen Bubbles into Tap Water Studied by the Rotary Chamber Technique", Chemie Ingenieur Technik, doi: 10.1002/cite.201500182
- 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
- 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