

DAS VOLUMEN OSZILLIERENDER GASBLASEN BEI DIFFUSIONS- VERSUCHEN

THE VOLUME OF OSCILLATING GAS BUBBLES DURING DIFFUSION MEAS- UREMENTS

Marius Nüllig, Franz Peters

Ruhr-Universität Bochum, Strömungsmechanik, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum

Gasblasen, Diffusion, Volumenbestimmung
Gas bubbles, diffusion, volume determination

Einleitung

Steigt eine Gasblase in ungesättigtem Wasser auf, verkleinert sie sich mit der Zeit, da zwischen der Blasenoberfläche und der umgebenden Flüssigkeit eine Konzentrationsdifferenz vorliegt. Das Gas diffundiert also in die Flüssigkeit, wodurch die Blase immer kleiner wird. Der Massentransport kann bestimmt werden, indem man die Volumenverkleinerung über der Zeit beobachtet.

Die Messung dieser Verkleinerungsrate wurde in der Vergangenheit für kleine sphärische Blasen bis 1,5mm Durchmesser mit der Drehkammertechnik untersucht [Nüllig, Peters 2013]. Mit dieser Technik ist es möglich den Durchmesser und die Aufstiegs geschwindigkeit der Blase gleichzeitig zu bestimmen und beide Größen über einen längeren Zeitraum zu messen [Peters, Biermann 2004].

Werden die Blasendurchmesser größer als 1,5mm, ist eine Deformation des Blasenvolumens zu beobachten [Biermann, Peters 2005]. Hinzu kommt das Oszillieren der gesamten Blase in der Strömung und bei weiterer Vergrößerung eine unregelmäßige Oszillation der Blasenform.

Der Fokus dieses Beitrages richtet sich auf die Bestimmung des Volumens frei aufsteigender Blasen bis ca. 10mm Durchmesser. Die Messmethode ermöglicht gleichzeitig auch die Bestimmung der Diffusionsrate solcher größeren Blasen in der Drehkammer.

Experimenteller Aufbau

Die verwendete Drehkammertechnik ist in Abb. 1 dargestellt. Die Drehkammer setzt sich aus zwei planparallelen Acrylglasplatten und einem zylindrischen Außengehäuse zusammen. Die Kammer fasst ca. 6,3l Wasser. Zur Messung des Blasenvolumens wird die Drehkammer vollständig mit Wasser gefüllt und anschließend über ein Antriebssystem in eine konstante Drehung Ω versetzt. Die Drehung führt zur Ausbildung eines konstanten Rotationsfeldes des Wassers in der Kammer. Wird eine Blase in die Kammer eingebracht, so nimmt sie, je nach Größe, eine bestimmte Position in der Drehkammer ein [Peters, Biermann 2004]. Aus der radialen Position r der Blase und der Winkelgeschwindigkeit Ω lässt sich die Aufstiegs geschwindigkeit der Blase bestimmen.

Eine der beiden Acrylglasplatten verfügt über eine zentrale Bohrung. Die Kammer ist von allen anderen Seiten verschlossen, sodass aus dieser Bohrung kein Wasser entweichen kann.

Der Kammerinnendruck bleibt zudem konstant, weil ein ständiger Kontakt zur Atmosphäre hergestellt ist.

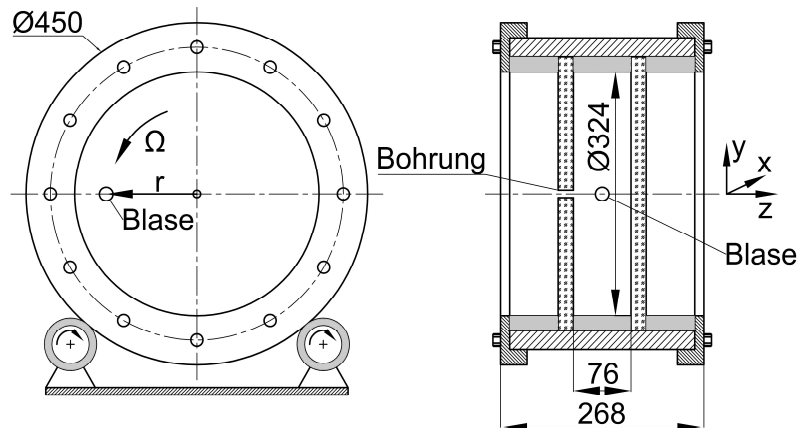


Abb. 1: Levitation einer Blase in der Drehkammer

Über diese Bohrung wird ein bekanntes Blasenvolumen in die Kammer eingebracht. Das Blasenvolumen wird mit einer Kalibrationspritze erzeugt. Die Kalibrationspritze besteht aus drei Teilen. Wie in Abb. 2 zu sehen, stecken dabei eine Glaskapillare und ein Verdrängerkolben in einem abgedichteten Gehäuse. Die Spritze ist zu Beginn vollständig mit Wasser gefüllt. Anschließend wird eine Blase und danach wieder ein bisschen Wasser in die Glaskapillare durch Verschieben des Verdrängerkolbens gezogen. Der Innendurchmesser der Glaskapillare ist sehr genau bekannt ($\pm 0,8\%$). Für die Volumenbestimmung der aufgezogenen Blase wird daher nur noch die Messung der Länge ΔL unter einem Mikroskop vorgenommen.

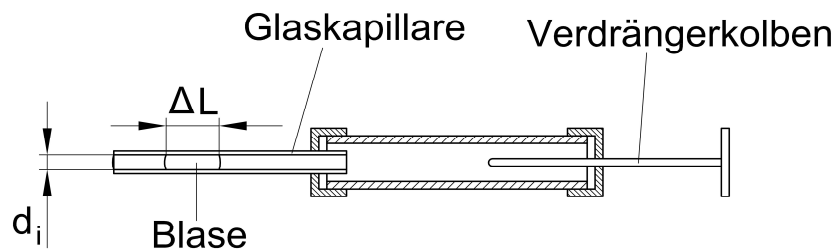


Abb. 2: Aufbau der Kalibrationspritze

Nachdem die vermessene Blase mit der Spritze in die Drehkammer eingebracht wurde, wird sie dort beim Aufstiegsvorgang erneut optisch vermessen.

Die Blase wird mit einer CCD-Kamera (*Imager Pro X4M*, 2048x2048) erfasst und das Bild in *DaVis 8.0* (*Fa. LaVision*) ausgegeben. Der Kamera genau gegenüber befindet sich ein Diffusor zur Herstellung von gestreutem Licht, siehe Abb. 3. Der Diffusordurchmesser beträgt 50mm. Blasenmittelpunkt und Diffusordurchmesser spannen einen Kegel von ca. 18° auf. Der Diffusor wird von einem gepulsten Nd:YAG Laser (*Solo III*, *New Wave*) angeregt. Kamera, Diffusor und Laser sind auf einer gemeinsamen Traverse gelagert, die durch einen Schrittmotor parallel zu den Acrylglasplatten (x-y-Richtung) verschoben werden kann. Dadurch liegen diese drei Bauteile immer auf einer Geraden senkrecht zur Kammer. Die Kamera kann zur Scharfstellung der Blase zusätzlich axial verschoben werden (z-Richtung). Durch Verschiebung der Traverse kann die Blase an jeder Position der Drehkammer anvisiert werden; die Kameraposition ist durch den Schrittmotor bekannt.

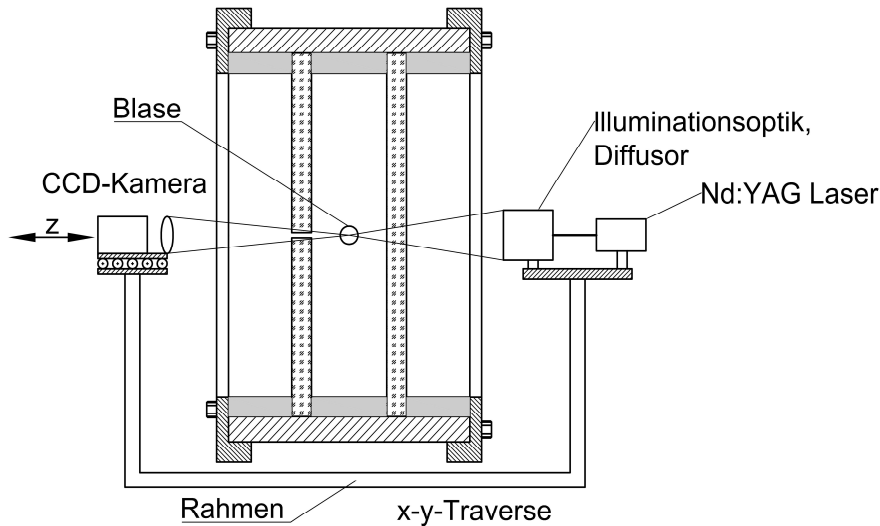


Abb. 3: Optischer Aufbau an der Drehkammer (Seitenansicht)

Geometrische Abbildung der Blase

Wie man in Abb. 4 erkennen kann, ergibt sich in der Bildebene des CCD-Chips bei Scharfstellung des Blasenrandes ein Bild der Blase. Eingezeichnet ist der Parallelstrahl, der vom Diffusor ausgehend die Blase gerade noch passiert. Da der Diffusor nicht nur parallele Strahlen aussendet, werden auch einige Strahlen wg. des flachen Auftreffwinkels kurz vor und hinter dem Blasenrand reflektiert (Fresnel'sche Gleichung [Hecht 2002]). Diese erreichen zwar auch die Bildebene, allerdings unscharf. Diese Unschärfe wird durch die Verwendung einer Blende ($f/22$) reduziert.

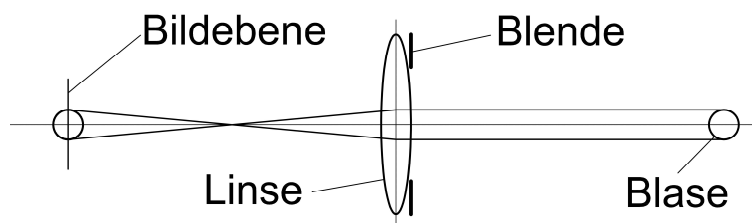


Abb. 4: Abbildung des Blasenrandes auf der Bildebene

Betrachtet man Strahlen, die auf die Blasenoberfläche treffen und in die Blase eindringen, ergeben sich die Strahlengänge wie in Abb. 5 gezeigt. Durch die Form der Blase und die Brechungsindizes ($n_{\text{H}_2\text{O}} = 1,33$ $n_{\text{Luft}} = 1,0$) werden die eintretenden Diffusorstrahlen stark zerstreut. Die Sammellinse (*Zeiss Macro Planar T*2,8/100*) der Kamera fängt das Licht anschließend wieder ein. Es entsteht ein Abbildungsbereich des Diffusors noch vor der Bildebene. Auf der Bildebene selbst entsteht dadurch eine unscharfe Abbildung des Diffusors. Die Vergrößerung **A** in Abb.5 zeigt, dass diese unscharfe Abbildung des Diffusors immer noch innerhalb des scharf abgebildeten Blasenrandes auf der Bildebene liegt.

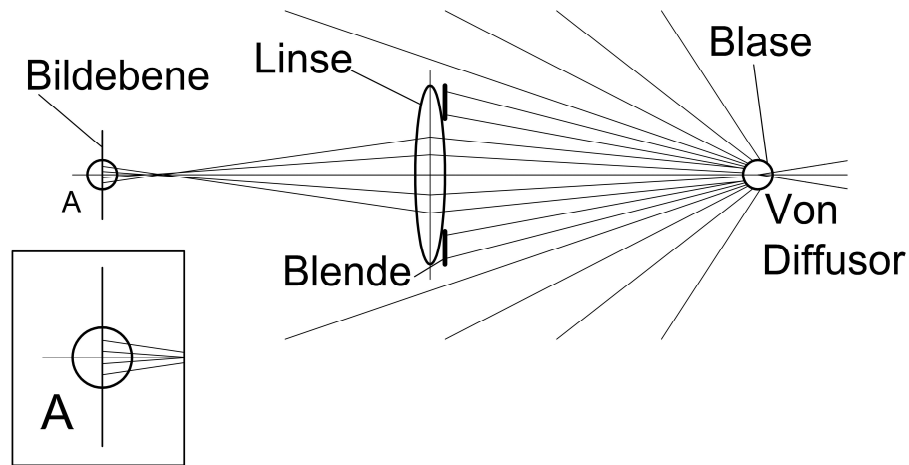


Abb. 5: Abbildung des durch die Blase transmittierten Diffusorlichtes auf der Bildebene

Eine Beispielaufnahme einer typischen sphärischen Luftblase für den oben vorgestellten optischen Aufbau ist in Abb. 6a zu sehen. Die helle Umgebung stellt das Streulicht des Diffusors dar. Der helle Fleck in der Mitte ist das Abbild des Diffusors. Da allerdings für die Aufnahme dieser Blase eine sehr kleine Blende ($f/22$) verwendet wurde, ist dieses Abbild des Diffusors sogar scharf zu sehen, dafür aber verzerrt. Bei Verkleinerung des Diffusordurchmessers z.B. mit einer Blende, verkleinert sich auch der Fleck in der Blasenmitte, vgl. Abb. 6b. Der schwarze Bereich wird also von keinem Lichtstrahl erreicht.

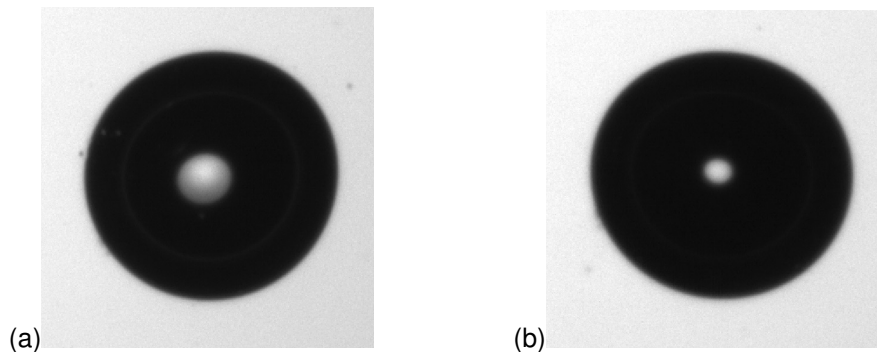


Abb. 6: Blasenbild bei Verwendung des normalen Diffusors (a) und bei Verkleinerung des Diffusordurchmessers mit einer Blende (b)

Die hier dargestellte optische Geometrie bezieht sich bisher nur auf kleine sphärische Blasen. Große Blasen sind beim Aufstieg stark deformiert und oszillieren in der Strömung. Das sich zeigende Blasenabbild ist dann nicht mehr kreisförmig, vgl. Abb. 9. Allerdings lassen sich die Erkenntnisse der sphärischen Blase gut auf die der deformierten übertragen. Auch hier gibt es einen scharf abgebildeten Blasenrand. Der helle Fleck im Inneren zeigt sich nicht als Kreis, sondern eher als Ellipse oder Streifen. Das Erscheinungsbild des Fleckes hängt von der Blasen geometrie ab, insbesondere von den auftretenden Krümmungsradien. Die Blase bleibt aber weiterhin auswertbar.

Bildverarbeitung

Die Messung des Blasendurchmessers wird über eine Analyse des aufgenommenen Pixelbildes mit einem *Matlab* Auswertungsprogramm erreicht [Peters, Arabali, 2012]. Abb. 7 zeigt exemplarisch das Bild einer solchen auszuwertenden Blase und einen Ausschnitt der Konturlinie (weiß), die zwischen dem hellen und dem dunklen Bereich liegt. Diese Kontur wird benötigt, um den äquivalenten Blasendurchmesser zu bestimmen.

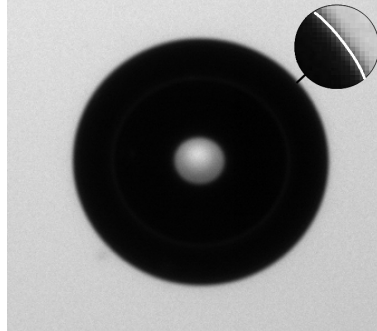


Abb. 7: Auffindung des Randes über den Grauwert Gradienten

Die Kontur wird mit den *Matlab* Funktionen *loadvec*, *edge* und *bwboundaries* ermittelt, indem zwischen dem hellen und dem dunklen Bereich nach einem Grauwertgradienten gesucht wird, der einem zuvor eingestellten Schwellwert (threshold) entspricht. Wird ein Pixel gefunden, das dem threshold entspricht, wird dieses der Kontur zugeordnet. Der threshold muss vor der Bildanalyse kalibriert werden. Die Kalibration wird mit rotationssymmetrischen Testblasen durchgeführt, deren Durchmesser d_0 exakt bekannt sind. Die Testblasen werden dazu mit der oben besprochenen Kalibrationsspritze hergestellt. Der threshold wird dann solange korrigiert bis der ausgewertete Durchmesser dem der Testblase entspricht.

Auswertung und Ergebnisse

Zur Ermittlung des äquivalenten Durchmessers in *Matlab* wird das Rotationsvolumen der Blasenprojektion ermittelt. Dazu wird die o.g. Blasenkontur mit einer vertikalen Achse in eine linke und eine rechte Hälfte geteilt. Die Achse liegt dabei genau in der Mitte des äußerst linken und rechten Punktes der Blasenprojektion, siehe Abb. 8. Danach werden beide Seiten scheinbar über diese Achse rotiert (360°) und summiert.

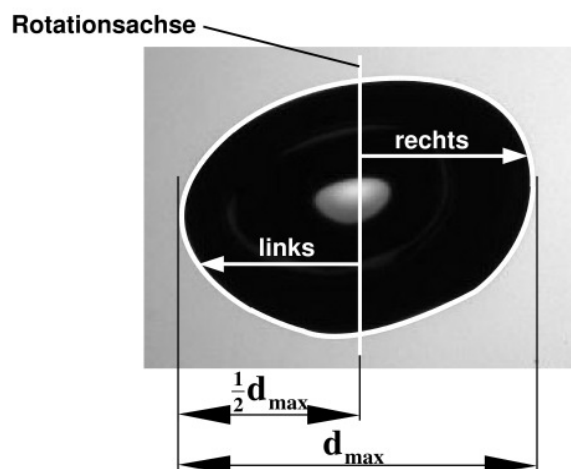


Abb. 8: Bildung des Rotationsvolumens an einer Blasenprojektion

Das Gesamtvolumen der Blase ergibt sich dann aus dem Mittelwert beider Rotationsvolumen. Da Pixel ausgewertet werden, muss dieses Pixel-Rotationsvolumen noch in das reale

Volumen (m^3) umgerechnet werden. Diese Umrechnung wird mit einer zuvor durchgeführten Skalierung vorgenommen, die jedem Pixel eine definierte reale Länge zuordnet. Anschließend wird aus dem Volumen noch der äquivalente Durchmesser d_e berechnet.

Steigen große Blasen in Wasser auf, so zeigt sich im direkten Vergleich zu kleinen Blasen eine permanente Veränderung der Blasenprojektionsfläche über der Zeit. Abb. 9 veranschaulicht, dass eine bestimmte Blasengröße zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten t_1 , t_2 und t_3 eine völlig unterschiedliche Form besitzen kann. Die Blasen nehmen dabei auch häufig nicht-rotationssymmetrische Formen an.

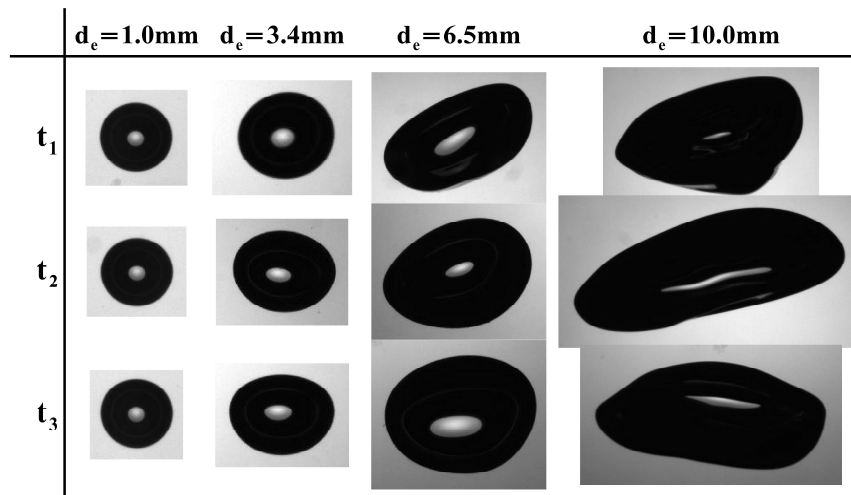


Abb. 9: Form verschiedener Blasengrößen zu unterschiedlichen Zeitpunkten t_1 bis t_3 (nicht maßstäblich)

Um dennoch einen Blasendurchmesser für ein bestimmtes Blasenvolumen zu erhalten, wurde versucht den Blasendurchmesser statistisch aus einer Serie von Bildern zu ermitteln. Dazu wurden die Blasen einzeln mit der Kalibrationsspritze in die Drehkammer eingebracht. Damit stand das tatsächliche Blasenvolumen bereits vorher fest. Anschließend wurde von dieser Blase eine Serie von Bildern gemacht (ca. 100 bis 200 Bilder) und jedes Bild über das oben angesprochene Rotationsverfahren ausgewertet und ein Durchmesser bestimmt. Da der Durchmesser bei zyklischen Bewegungen immer wieder einen bestimmten mittleren Wert passieren muss, wurde überprüft wie nah der Median einer Serie $d_{e,Median}$ am vorgegebenen Durchmesser $d_{e,set}$ liegt. Das Ergebnis lässt sich aus Tab. 1 entnehmen.

Tab. 1: Vergleich der optisch gemessenen Blasendurchmesser mit denen der durch die Spritzentechnik vorgegebenen

Serie	$d_{e,set}$ mm	$d_{e,Median}$ mm	Abw. %	$Q_{0,05}(d_e)$ mm	$Q_{0,95}(d_e)$ mm
1	2,904	3,066	5,6	2,941	3,154
2	3,444	3,545	2,9	3,431	3,650
3	4,028	4,087	1,5	3,998	4,179
4	4,611	4,636	0,5	4,475	4,796
5	5,075	5,113	0,7	4,776	5,532
6	5,556	5,667	2,0	5,384	5,946
7	6,042	6,227	3,1	5,751	6,530
8	6,524	6,383	-2,2	5,771	6,943
9	7,000	6,921	-1,1	6,458	7,470
10	7,517	7,733	2,9	7,067	8,423
11	8,013	8,117	1,3	7,186	9,012
12	8,493	8,683	2,2	7,731	9,541
13	9,025	9,225	2,2	8,105	10,437
14	9,501	9,493	-0,1	8,570	10,698
15	10,015	10,643	6,3	9,426	12,229

In Abb. 10 wird die Nähe des Medians zu einer idealen Referenzgerade veranschaulicht, die sich ergeben würde, wenn gemessene und tatsächliche Blasendurchmesser gleich groß wären. Die kleinen schwarzen Punkte zeigen alle Durchmesser $d_{e, \text{Mess}}$ an, die für jeweils eine feste Blasengröße $d_{e, \text{set}}$ gemessen wurden. Der große schwarze Punkt in der Mitte einer jeden Serie gibt den Median $d_{e, \text{Median}}$ wieder. Man erkennt, dass der Median aller Durchmesser bemerkenswert nah am tatsächlichen $d_{e, \text{set}}$ liegt. Die Streubreite der Durchmesser einer Serie kann mit einem Quantil charakterisiert werden, dabei liegen 90% aller gemessenen Durchmesser zwischen den Grenzen $Q_{0,05}(d_e)$ und $Q_{0,95}(d_e)$, vgl. Tab. 1.

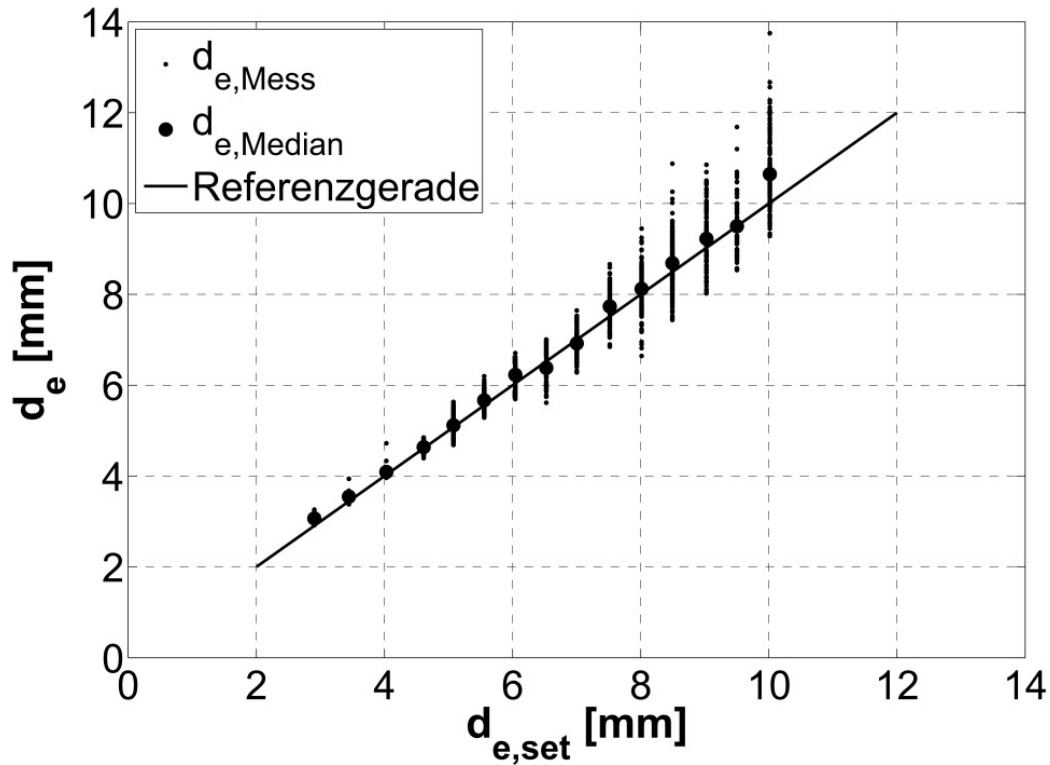


Abb. 10: Grafische Auftragung der gemessenen zu den tatsächlichen Blasendurchmessern

Die erfolgreiche Auswertbarkeit des Volumens großer Blasen erlaubt auch eine kontinuierliche Beobachtung solcher Volumen über der Zeit. Damit ist die Voraussetzung erfüllt die Diffusion von großen aufsteigenden Gasblasen in Flüssigkeiten zu bestimmen. Messungen dazu laufen bereits. Wie man in Abb. 10 sieht wird die Streuung der Durchmesser $d_{e, \text{Mess}}$ am Ende zu groß, um Blasen $>10\text{mm}$ zuverlässig vermessen zu können. Die hier angewendete statistische Methode funktioniert, muss aber derzeit ohne eine schlüssige physikalische u. mathematische Begründung auskommen.

Danksagung

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

Literaturverzeichnis

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

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

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

Hecht, E., 2002: "Optics", 4th ed., Addison-Wesley, Reading, MA

Peters, F., Arabali, D., 2012: "Eine neue Methode zur Bestimmung der Grenzflächenspannung zwischen Öl und Wasser", 20. Fachtagung der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie, Rostock