

Bestimmung der Blasengröße und 3D-Position in Zweiphasenströmungen mittels Defokussierungsmethoden

Sizing and 3D-positioning of bubbles in two-phase flows with defocusing techniques

Dominik Baczyzmalski, Katharina Haase, Christian J. Kähler, Christian Cierpka

Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

Schlagwort: Zweiphasenströmung, 3D Blasenvisualisierung, Astigmatismus, Defokussierung
Key words: Two-phase flow, 3D bubble visualization, astigmatism, defocusing

Zusammenfassung

Stoff- und Wärmetransportprozesse in Gas-Flüssig-Mehrphasenströmungen können maßgeblich durch die Bewegung und Form der auftretenden Gasblasen beeinflusst werden. Die experimentelle Charakterisierung ist allerdings oftmals nur schwer durchzuführen. Zur Bestimmung der Blasenbewegung und deren Form wird im Rahmen dieses Beitrags ein Messverfahren zur Messung der 3D-Blasenposition und deren Größe mit nur einer Kamera vorgestellt. Die Blasen werden dazu im Durchlichtverfahren mit einer diffusen Lichtquelle beleuchtet und deren Schattenkontur von einer Kamera aufgenommen. Der Anteil des von der Blase gestreuten Lichts, welches die Blasenabbildung signifikant beeinflussen kann, muss hierbei gering gehalten werden, wodurch sich gewisse Voraussetzungen bzgl. der zu verwendenden Beleuchtung und Aufnahmeoptik ergeben. Die Rekonstruktion der Tiefenposition der Blase und deren tatsächlichen Größe kann dann durch Auswertung der tiefenabhängigen defokussierten 2D-Blasenabbildung erfolgen. Durch eine Zylinderlinse im Strahlengang kann zudem eine optische Verzerrung (Astigmatismus) erzeugt werden, wodurch die horizontale und vertikale Fokusebene nicht mehr in einer Ebene liegen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Defokussierungsverfahren kann hierdurch der Tiefenabstand der Blase zu den Fokusebenen und damit auch die Blasengröße eindeutig bestimmt werden. Anhand von theoretischen Zusammenhängen und experimentellen Untersuchungen wird ein Algorithmus zur Auswertung der tiefenabhängigen Blasenabbildung und die Ergebnisse eines Kalibrierversuchs vorgestellt.

Einleitung

Das Verhalten von Gasblasen in Gas-Flüssig-Zweiphasenströmungen ist für eine Vielzahl von strömungsmechanischen und verfahrenstechnischen Problemstellungen von großem Interesse. Die Dynamik der Blasenbewegung als auch deren Form sind wichtige Parameter, die den Stoff- und Wärmetransport beeinflussen. Die grundlegenden Mechanismen dieser Prozesse sind bis heute noch nicht im Detail verstanden und benötigen die genaue Kenntnis der Bewegung und Form der Blase, sowie deren Umströmung. Eine simultane Messung die-

ser Größen ist jedoch nur schwer durchzuführen und grundsätzlich mit sehr hohem Aufwand verbunden.

Für die berührungslose und simultanen Erfassung der Blasenbewegung und deren Form kommen häufig optische Messverfahren zum Einsatz. Üblicherweise werden die Blasen dafür im Durchlichtverfahren diffus beleuchtet und deren Schatten von einer oder mehreren Kameras aufgenommen. Bei einfachen 2D-Verfahren mit nur einer Kamera besteht grundsätzlich das Problem, dass eine genaue Bestimmung der Blasengröße nur innerhalb der Fokusebene möglich ist. Zur Auswertung der 2D-Position und Größe von Blasen, die sich in der Fokusebene befinden, werden verschiedenste Verfahren angewandt (z.B. Bröder und Sommerfeld 2007; Dehaeck et al. 2007; Honkanen et al. 2005). Die Bestimmung der 3D-Blasenposition kann hingegen mit Mehrkamarasystemen erfolgen (z.B. Fujwara et al. 2004; Klinner und Willert 2012; Belden et al. 2012). Ein solches Messsystem ist zwar für Messungen bei hohen Blasenkonzentrationen vorteilhaft, jedoch mit einem deutlichen Mehraufwand und einer höheren Komplexität verbunden. Zudem ist ein Mehrkamarasystem bei Messstrecken mit beschränktem optischem Zugang nur bedingt realisierbar, vor allem wenn neben der Blasenbewegung das umgebende 2D oder 3D-Geschwindigkeitsfeld simultan vermessen werden soll. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit die Tiefenposition der Blase mit nur einer Kamera zu bestimmen. Pereira et al. (2000) nutzen beispielsweise eine Kamera mit einer Mehrlochblende, wodurch jedoch u.a. eine sehr hohe Beleuchtungsintensität benötigt wird. Eine weitere Möglichkeit die Tiefenposition der Blase und deren Größe aus einem 2D-Bild zu rekonstruieren besteht darin, die tiefenabhängige Defokussierung (Unschärfe) der Blasenabbildung zu nutzen (Bongiovanni 1997; Jähne und Geißler 1994; Geißler und Jähne 1996). Hierbei ist es jedoch nicht möglich festzustellen, ob sich die Blase vor oder hinter der Fokusebene befindet, wodurch Einschränkungen hinsichtlich der Position der Fokusebene und Größe des Messvolumens entstehen.

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein Defokussierungsverfahren zur Bestimmung der 3D-Blasenposition und der Blasengröße vorgestellt. Bei diesem Verfahren werden die Blasen im Durchlichtverfahren mit einer diffusen Lichtquelle beleuchtet und deren Schattenkontur von einer Kamera aufgenommen. Sowohl die fokussierte als auch die defokussierte Schattenkontur und damit auch die Messgenauigkeit werden durch Lichtstreuung an der Blase signifikant beeinflusst. Der Einfluss des aufgenommenen Streulichts muss daher möglichst gering gehalten werden, wodurch sich gewisse Voraussetzungen bzgl. der zu verwendenden Hintergrundbeleuchtung, Aufnahmeoptik und des zulässigen Abstandes der Blase von der Fokusebene ergeben. Die Tiefenposition der Blasen und deren tatsächliche Größe können dann durch Auswertung der defokussierten Grauwertintensitätsverteilung des Blasenschattens bestimmt werden. Anhand von theoretischen Zusammenhängen wird ein Algorithmus zur Auswertung der tiefenabhängigen Blasenabbildung vorgestellt. Anhand eines ersten Kalibrierversuchs werden das Messprinzip und die potentiellen Fehlerquellen untersucht. Des Weiteren wird die mögliche Erweiterung des Messverfahrens um eine Zylinderlinse im Strahlengang diskutiert. Diese bewirkt eine optische Verzerrung (Astigmatismus), wodurch die horizontale und vertikale Fokusebene nicht mehr in einer Ebene liegen (Cierpka et al. 2010). Der Vorteil gegenüber herkömmlichen Defokussierungsmethoden besteht dabei darin, dass durch Auswertung der horizontalen und vertikalen Intensitätsverteilung eine richtungseindeutige Bestimmung der Tiefenposition möglich wird.

Lichtstreuung an diffus beleuchteten Luftblasen

Im Schatten- bzw. Durchlichtverfahren werden Blasen meist mit einer diffusen inkohärenten Lichtquelle von beleuchtet. Der vom Kameraobjektiv abgebildete Schatten gleicht i.A. nicht der einer lichtundurchlässigen Scheibe, da Lichtstrahlen an der Blase sowohl reflektiert wer-

den als auch die Blase unter mehrfacher Brechung passieren können und somit die Abbildung beeinflussen. Bongiovanni et al. (1997) untersuchten anhand einer Strahlengangsimulation basierend auf den Gesetzen der Photometrie und der geometrischen Optik für Luftblasen mit Durchmessern $d_b > 100 \mu\text{m}$ in Wasser den Einfluss der jeweiligen Strahlen auf die Schattenabbildung. Ihre Ergebnisse machen deutlich, dass eine zuverlässige Tiefenpositions- und Blasengrößenbestimmung nicht möglich ist, wenn der Anteil der Lichtstrahlen, die reflektiert und gebrochen werden, die Intensitätsverteilung am Blasenrand beeinflusst (s. vereinfachte Darstellung in Abb. 1). Eine zuverlässige Positions- und Größenbestimmung anhand der Blasenabbildung ist daher nur möglich, wenn die Schattenabbildung (vor allem der Rand) näherungsweise derjenigen einer lichtundurchlässigen Scheibe entspricht, was zu einigen Voraussetzungen bzgl. der Beleuchtungsquelle und dem zulässigen Abstand der Blase von der Fokusebene führt. Die Voraussetzung, dass der Blasen Schatten dem einer lichtundurchlässigen Scheibe entspricht, ist zudem für den Kalibrierprozess vorteilhaft, da ein einfaches transparentes Target mit dunklen Scheiben blasenäquivalente Schattenkonturen entstehen lässt.

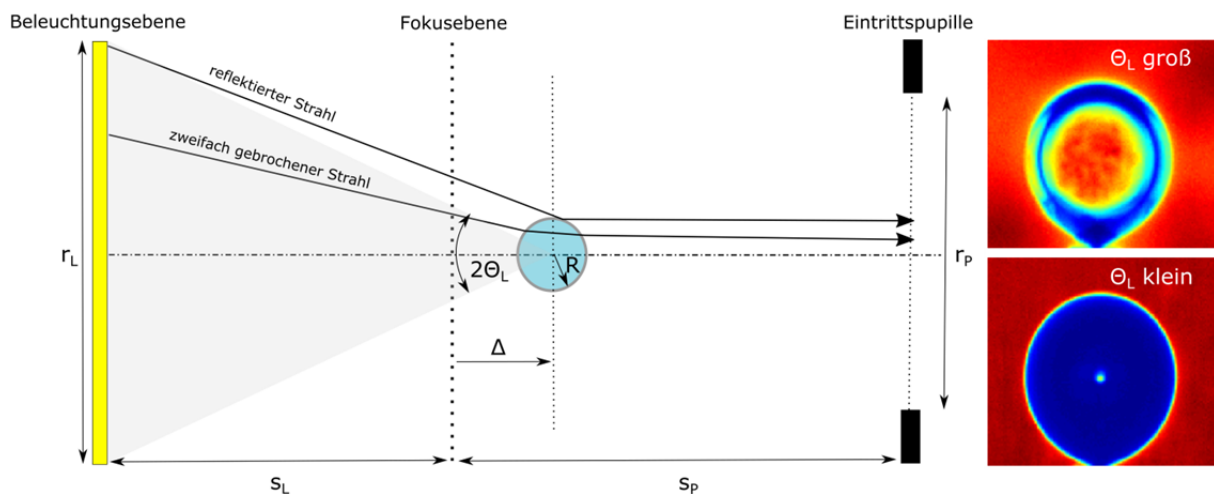


Abb. 1: Skizze der Blasenvisualisierung im Schattenverfahren mit diffuser Hintergrundbeleuchtung in Anlehnung an die Darstellung in Bongiovanni et al. (1997) (links) und experimentelle Blasen aufnahmen bei verschiedenen Abständen der Beleuchtungsebene (rechts).

Für die resultierende Schattenabbildung spielt der Winkel unter dem die Blase die diffuse Beleuchtungsebene sieht $\theta_L = \arctan\left(\frac{r_L}{s_L + \Delta}\right)$ eine wesentliche Rolle. Wie in Abb. 1 zu erkennen ist, können die am Blasenrand reflektierten Strahlen den Intensitätsverlauf am Blasenrand beeinflussen und dadurch die Blasen kleiner erscheinen lassen. Der Einfluss dieser Strahlen auf den (i.A. defokussierten) Intensitätsverlauf am Blasenrand ist vernachlässigbar solange $\theta_L < 12^\circ$ für die Beleuchtung eingehalten wird (Bongiovanni et al. 1997). Die Strahlen, die dann die Blase passieren, sind grundsätzlich aufgrund der mehrfachen Brechung schwächer und bilden einen hellen Bereich um den Mittelpunkt der Blase. Bei moderaten θ_L und Defokussierung Δ ist der Einfluss auf den zentralen Bereich begrenzt und beeinflusst nicht die Intensitätsverteilung am Schattenrand. Bei stärkerer Defokussierung können jedoch auch diese Strahlen die Intensitätsverteilung am Rand beeinflussen. Für $\theta_L \approx 12^\circ$ bleibt der Einfluss auf den mittleren Bereich begrenzt solange $\Delta^* = \frac{|\Delta| r_p}{R s_p} < 0.35$ (Δ^* ist ein dimensionsloser Defokussierungsparameter, der den lokalen Aperturwinkel $\frac{r_p}{s_p}$ berücksichtigt und mit dem Blasenradius normiert wird). Liegt eine stärkere Defokussierung vor, verringert sich der Kontrast des Schattens, so dass eine solche Blase im Laufe der Bildverarbeitung aussortiert

werden kann (Bongiovanni et al. 1997). Insgesamt sollte also $\theta_L < 12^\circ$ und $\Delta^* < 0.35$ eingehalten werden, damit der fokussierte und defokussierte Intensitätsverlauf am Blasenrand sich äquivalent zu einer lichtundurchlässigen Scheibe verhält.

Tiefenpositions- und Größenbestimmung

Unter Beachtung der Ausführungen im letzten Kapitel wird im Folgenden davon ausgegangen, dass der Blasenschatten demjenigen einer lichtundurchlässigen Scheibe entspricht und dass $\Delta^* < 0.35$ beträgt. In Näherung der geometrischen Optik und unter Vernachlässigung von Beugungseffekten und optischen Aberrationen formulieren Bongiovanni et al. (1997) die Intensitätsverteilung der defokussierten Schattenabbildung einer lichtundurchlässigen Scheibe (s. Abb. 2 zur Veranschaulichung von 2D-Schattenbildung und zugehörigen Intensitätsverteilungen) als analytische Funktion $E(\rho^*, \Delta^*)$, wobei

$$\Delta^* = \frac{|\Delta| r_p}{R s_p} \quad \text{und} \quad \rho^* = \frac{\rho}{R} \left(1 - \frac{\Delta}{s_p}\right)$$

Dabei ist ρ der Abstand zum Mittelpunkt der Abbildung und ρ^* der relative Abstand gewichtet mit dem Vergrößerungsfaktor, der vom relativen Abstand des Objektes von der Fokusebene abhängt. Die Idee des Messverfahrens besteht darin, die tiefenabhängige Intensitätsverteilung der Abbildung auszuwerten und daraus die tatsächliche Größe und die Tiefenposition zu ermitteln. Ein charakteristischer Wert für die abgebildete Blasengröße kann durch die Festlegung eines Schwellwerts – z.B. bei halber Intensität der Abbildung – bestimmt werden. Aus der Funktion $E(\rho^*, \Delta^*)$ lässt sich für den Radius bei halber Intensität $\rho_{1/2}$ numerisch für $\Delta^* < 0.35$ folgender Zusammenhang bestimmen:

$$(1) \quad \frac{\rho_{1/2}}{R} = \frac{\rho_{1/2}^*}{1 - \frac{\Delta}{s_p}} \approx \frac{-0.168 \left(\frac{|\Delta| r_p}{R s_p}\right)^2 + 1}{1 - \frac{\Delta}{s_p}}$$

Während die Defokussierung des Abbildungsrandes dazu führt, dass der gemessene Durchmesser kleiner wird, kann der Vergrößerungsfaktor $1 - \frac{\Delta}{s_p}$ dem entgegenwirken, da Objekte die näher am Objektiv sind größer erscheinen. $\rho_{1/2}/R$ ist daher keine symmetrische Funktion von Δ . Die Bestimmung der Tiefenposition Δ kann beispielsweise über den Intensitätsgradienten bei $\rho_{1/2}$ bestimmt werden:

$$(2) \quad G_{1/2} = \frac{dE}{d\rho}(\rho_{1/2}) = \frac{dE}{d\rho^*}(\rho_{1/2}^*) \frac{d\rho^*}{d\rho} \approx 0.526 \frac{1 - \frac{\Delta}{s_p}}{|\Delta| \frac{r_p}{s_p}}$$

Der Gradient verhält sich generell invers proportional zu $|\Delta|$ und ist aufgrund des Vergrößerungsfaktors nicht symmetrisch zu Δ . Damit kann aus dem Gradienten unabhängig von der Blasengröße die Tiefenposition bestimmt werden. Es gibt jedoch zwei mögliche Lösungen, so dass nicht eindeutig festgestellt werden kann, ob sich das Objekt vor oder hinter der Fokusebene befindet. Die tatsächliche Blasengröße R kann bei Kenntnis von $\rho_{1/2}$ und Δ aus dem Zusammenhang von Gl. (1) bestimmt werden. Anstelle von Gl. (1) kann auch $G_{1/2} \cdot \rho_{1/2}$ (symmetrische Funktion von Δ) verwendet werden. Eine weitere Möglichkeit die Tiefenposition zu bestimmen besteht darin, das Integral des Intensitätsverlauf innerhalb des durch den Schwellwert (0.5) bestimmten Bereichs zu berechnen und auf $\rho_{1/2}$ zu normieren:

$$(3) \quad \hat{I}_{1/2} = \frac{1}{\rho_{1/2}} \int_0^{\rho_{1/2}} E(\rho, \Delta^*) d\rho = \frac{1}{\rho_{1/2}^*} \int_0^{\rho_{1/2}^*} E(\rho^*, \Delta^*) d\rho^* \approx -0.42 \frac{|\Delta| r_p}{R s_p} + 1$$

Die normierte integrale Intensität verhält sich also linear und symmetrisch mit Δ/R . Die absolute Tiefenposition ist dadurch jedoch noch nicht bestimmt. Gl. (1) lässt sich umschreiben zu:

$$(4) \quad \frac{\rho_{1/2}}{R} = -0.168 \left(\frac{|\Delta| r_p}{R s_p} \right)^2 + 1 + \frac{\Delta}{R} \frac{\rho_{1/2}}{s_p}$$

Bei Kenntnis von $\rho_{1/2}$ und Δ/R aus Gl. (3) lässt sich also $\rho_{1/2}/R$ und somit R und Δ bestimmen.

Die Gleichungen (1)-(4) geben zwei verschiedenen Möglichkeiten zur Bestimmung der Tiefenposition und Größen aus der Intensitätsverteilung an. Diese gelten für den Fall, dass die Parameter des optischen Aufbaus r_p und s_p genau bekannt sind und dass keine optischen Aberrationen und Beugungseffekte auftreten. Außerdem wird die endliche Auflösung des Kameraschips nicht beachtet, die jedoch bei der Bildauswertung eine Rolle spielt. Um die vernachlässigten Effekte und die ggf. unbekannt Parameter zu berücksichtigen, ist eine Kalibrationsmessung mit Objekten bekannter Größe und Position notwendig. Optische Aberrationen können beispielsweise über eine zusätzliche Abhängigkeit der Messgrößen von den Ortskoordinaten der Bildebenen (X, Y) berücksichtigt werden. Der Informationsverlust aufgrund der endlichen Auflösung kann hingegen anhand der zusätzlichen Abhängigkeit von der gemessenen Blasengröße $\rho_{1/2}$ mit einbezogen werden. Die Bestimmung der gesuchten Größen anhand des gemessenen Gradienten $G_{1/2}$ und der gemessenen Blasengröße $\rho_{1/2}$ könnte dann durch eine Vorschrift der Form:

$$(5) \quad \Delta = f(G_{1/2}, \rho_{1/2}, X, Y)$$

$$(6) \quad R = f(\Delta, \rho_{1/2}, X, Y)$$

erfolgen. Die Bestimmung der gesuchten Größen anhand des normierten Intensitätsintegrals $\hat{I}_{1/2}$ und $\rho_{1/2}$ erfolgt hingegen mit der Vorschrift:

$$(7) \quad \Delta/R = f(\hat{I}_{1/2}, \rho_{1/2}, X, Y)$$

$$(8) \quad \rho_{1/2}/R = f(\Delta/R, \rho_{1/2}, X, Y)$$

$$(9) \quad R = \rho_{1/2}/(\rho_{1/2}/R) \text{ und } \Delta = (\Delta/R)R$$

Zur Kalibration kann beispielsweise ein ebenes transparentes Kalibrierziel mit einem Muster von dunklen Scheiben unterschiedlicher Größe verwendet werden. Wie schon zuvor erwähnt wurde, ist mit dem vorgestellten Verfahren sowohl die Tiefenpositions- als auch Größenbestimmung nicht eindeutig möglich. Für eine eindeutige Messung sollte die Fokusebene am Rand des Messvolumens liegen, wodurch der mögliche Messbereich jedoch begrenzt wird. Eine andere Möglichkeit eine eindeutige Größenbestimmung zu erhalten besteht darin, eine Zylinderlinse im Strahlengang zu platzieren. Diese kann eine optische Verzerrung (Astigmatismus) erzeugen, wodurch die horizontale und vertikale Fokusebenen nicht mehr in einer Ebene liegen (Cierpka et al. 2010). Durch die getrennte Auswertung der 2D-Schattenabbildung in horizontaler und vertikaler Richtung sind die Tiefe und die Größe der Blase dann eindeutig bestimmbar.

Bildauswertung

Die implementierte Bildauswertung dient der direkten Bestimmung der Messgrößen und läuft wie folgt ab:

- I. **Objekterkennung:** Die Aufnahmen werden zunächst invertiert und zur Objekterkennung ein Schwellwert festgelegt der über den Intensitäten des Hintergrundes liegt. Durch die Randpunkte der erkannten Objekte wird dann ein Ellipsenfit bestimmt, mit dem sowohl die Achsengrößen als auch der Mittelpunkt bestimmt werden kann. Zur späteren Auswertung der Intensitätsverteilung des jeweiligen Objektes werden die Achsen jedoch künstlich vergrößert, wodurch der gewählte Schwellwert etwas höher ausfallen darf. Dies kann bei stärkerem Hintergrundrauschen vorteilhaft sein.
- II. **Hintergrundbestimmung:** Zur Bestimmung der im letzten Kapitel vorgestellten Messgrößen muss die Abbildung bei halber Intensität ausgewertet werden. Um diesen Punkt zu finden, muss die Intensität des Hintergrundbildes (Nullwert) bekannt sein. Daher sollte vor der Messung ein Hintergrundbild ohne Objekte aufgenommen werden, welches von den Messbildern abgezogen werden kann. Alternativ kann mit den im ersten Schritt erkannten Objekten eine Maske über das Bild gelegt werden, die die Objekte selbst ausblendet und durch die restlichen Punkte eine Polynomfit des Hintergrunds erstellt werden. Insgesamt sollte auf eine sehr homogene Ausleuchtung geachtet werden, da die Subtraktion eines inhomogenen Hintergrunds i.A. Intensitätsverlauf des abgebildeten Schattens verfälscht.
- III. **Bestimmung von Intensitätsverläufen:** Anschließend werden die einzelnen Objekte (invertiert und mit abgezogenem Hintergrundbild) getrennt ausgewertet (s. Abb. 2 links). Die Objektabbildung wird auf ihre Maximalintensität normiert, so dass die Intensitätswerte zwischen 0 und 1 liegen. Grundsätzlich ist es möglich das gesamte 2D-Bild des Objektes für die Auswertung zu benutzen. In Hinblick auf die Erweiterung des Verfahrens um eine Zylinderlinse (Astigmatismusverfahren), bei dem zwei unterschiedliche Fokusebenen in horizontaler und vertikaler Richtung erzeugt werden, werden hier lediglich die Intensitätsverläufe entlang der horizontalen und vertikalen Mittellinie bzw. mittlere Pixelreihe betrachtet. Zur Reduktion von Rauschen werden zusätzlich ein paar mehr Linien um die Mittellinie verwendet und daraus ein gemittelter Intensitätsverlauf bestimmt. Der Mittelungsbereich sollte allerdings nicht zu groß gewählt werden, da sonst das eigentliche Messsignal verfälscht wird.
- IV. **Gradientenbestimmung:** Die gemittelten horizontalen und vertikalen Intensitätsverläufe werden mittig geteilt, so dass in jeder Richtung jeweils zwei Verläufe entstehen (s. Abb. 2 rechts). Um die Stelle bei halber Intensität wird ein Bereich definiert, um den ein linearer Fit den Intensitätsverlauf approximieren soll. Der als Messwert verwendete Gradient entspricht der Steigung dieser Geraden. Ein Bereich von $\pm 20\%$ (30-70%) der maximalen Intensität hat sich als sehr robust für die Bestimmung eines charakteristischen Gradienten herausgestellt. Die zwei horizontalen und vertikalen Gradienten werden im Anschluss gemittelt, so dass für jede Richtung ein charakteristischer Gradient bestimmt wurde.
- V. **Durchmesser bei halber Intensität:** Anhand der horizontalen und vertikalen Intensitätsverläufe wird außerdem der jeweilige Durchmesser bei halber Intensität $D_{1/2} = 2 \rho_{1/2}$ bestimmt.
- VI. **Normiertes Intensitätsintegral:** Als weiterer Messwert für die Tiefenposition wird das Intensitätsintegral zwischen $\pm \rho_{1/2}$ (bezogen auf den Mittelpunkt) für die horizontale und vertikale Richtung bestimmt und mit dem entsprechenden $D_{1/2}$ normiert. Bei

der Bestimmung des Integrals muss darauf geachtet werden, dass die Blasen in der Mitte meist etwas Licht durchlassen. Diese „Lücke“ wird durch Interpolation zwischen den Maximalwerten des linken und rechten (bzw. oberen und unteren) Intensitätsverlaufs geschlossen.

Der Mittelpunkt des Objekts, der Durchmesser bei halber Intensität $D_{1/2}$, die Gradienten in horizontaler und vertikaler Richtung, als auch die normierte integrale Intensität in beiden Richtungen bilden die Messwerte des Verfahrens.

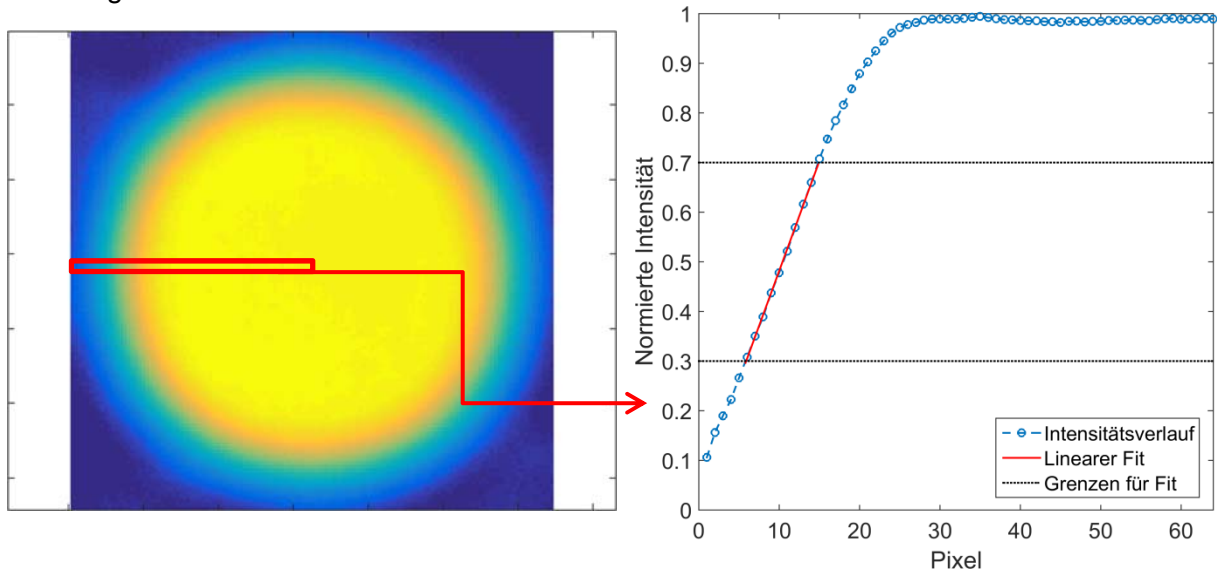


Abb. 2: Invertiertes 2D-Bild einer defokussierten lichtundurchlässigen Scheibe (links); Normierter Intensitätsverlauf (entlang einer mittig verlaufenden Linie) am linken Bildrand (rechts).

Kalibrationsversuch

Zur Validierung des Messprinzips wurde zunächst ein Kalibrierversuch mit einem in Tiefenrichtung (z oder Δ) verschiebbaren Kalibrierverfahren durchgeführt. Für das Kalibrierverfahren wurde eine Scheibe mit einer transparenten Folie beklebt, auf welcher dunkle Scheiben mit einem Durchmesser von 2 und 3 mm im Abstand von 6,5 mm gedruckt wurden (s. Abb. 3). Das Kalibrierverfahren wurde an einer Traverse in einem der Messstrecke eines vertikalen Wasserkanals (s. Haase et al. 2015) platziert und von hinten mit einer LED mit Lichtdiffusor beleuchtet. Die Schattenabbildung wurde mit einer sCMOS-Kamera bei verschiedenen Tiefenpositionen aufgezeichnet. Das Messvolumen betrug in etwa $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$. Pro Tiefenposition wurden jeweils 20 Scheiben von 2 mm und 3 mm Durchmesser ausgewertet.

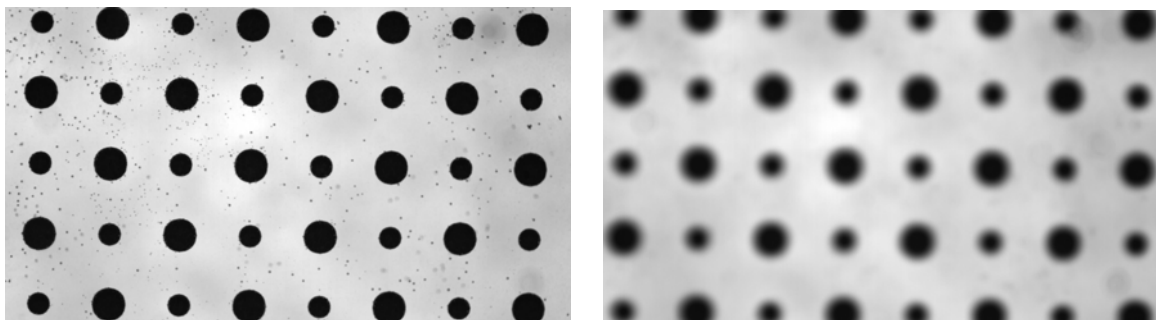


Abb. 3: Fokussierte (links) und defokussierte (rechts) Aufnahme des Kalibriertargets.

In Abb. 4 sind die Ergebnisse der Auswertung der Gradienten und normierten Intensitätsintegrale für verschiedene Tiefenpositionen dargestellt. Die Gradienten sind in erster Näherung von der Objektgröße unabhängig und folgen dem Trend aus Gl. (2). Die größte Streuung entsteht in der Nähe der Fokusebene, da hier der Anstieg der Intensität sehr groß wird und die Messung des Gradienten dementsprechend ungenauer. Die normierten Intensitätsintegrale folgen ebenfalls dem mit $|\Delta|/R$ linear abfallenden Trend aus Gl. (3). Der zur 3D-Verfolgung von Blasen nutzbare Bereich $\Delta^* < 0.35$ kann aus Gl. (3) zu $\hat{I}_{1/2} \geq 0.85$ abgeschätzt werden. Wie auch in Abb. 4 zu erkennen ist, ist die mögliche Messvolumentiefe für große Blasen größer. Die gemessene Blasengröße bei halber Intensität bezogen auf die tatsächliche Größe ist in Abb. 5 dargestellt. Gemäß Gl. (1) verhält sich diese Messgröße nicht symmetrisch zur Fokusebene. Die Verläufe für beide Scheibengrößen liegen außerdem nicht direkt aufeinander, da $\rho_{1/2}/R$ neben Δ selbst auch von $|\Delta|/R$ abhängt. Der Messfehler in der Fokusebene sollte hier eher gering ausfallen, beträgt aber durchaus 3-4 Pixel. Ein Grund für diese Abweichung ist neben der Bildauswertung selbst die Tatsache, dass die auf die Folie gedruckten Scheiben u.U. nicht exakt dieselbe Größe haben. Viel wahrscheinlicher ist die Messungenauigkeit aber auf Inhomogenitäten im Hintergrund zurückzuführen. Das Verhältnis der mittleren Intensitätsschwankung des Hintergrunds zum eigentlichen Schatten-signal betrug bei der Messung in etwa $\pm 7\%$, wodurch der Durchmesser nicht bei 50% der maximalen Intensität sondern im Bereich von $50\% \pm 3,5\%$ der maximalen Intensität bestimmt wird, was vor allem bei stärkerer Defokussierung einen hohen Messfehler bewirken kann (s. Abb. 5). Die Homogenität des Hintergrunds ist daher – auch für die anderen Messgrößen – ein entscheidender Faktor, der die Messgenauigkeit beeinflusst. Dieser Einfluss kann aber durch das Aufnahmen eines Hintergrundbildes ohne Blasen verringert werden.

Aus den Messgrößen wurden Kalibrierfunktionen gemäß Gl. (5)-(9) abgeleitet. Zur Überprüfung der Kalibration wurden die Kalibrierfunktionen auf die Messdaten angewandt. Die daraus berechnete Tiefenposition und Scheibengröße wurde mit den tatsächlichen Größen verglichen. Abb. 6 zeigt diesen Vergleich für die 3 mm großen Scheiben. Der Messfehler (Standardabweichung) bei der Tiefenpositionsbestimmung anhand der Intensitätsgradienten beträgt insgesamt etwa $\pm 0,5$ mm bei einem Messbereich von etwa 50 mm. Die größten Fehler entstehen in der Nähe der Fokusebene aufgrund der hohen Gradienten und bei starker Defokussierung, da die Änderung der Gradienten mit der Tiefenposition nur noch sehr gering ausfällt (vgl. Abb. 4). Die Tiefenpositionsbestimmung anhand der normierten Intensitätsintegrale hat insgesamt eine mit der Gradientenmethode vergleichbare Genauigkeit (nicht dargestellt). Die Messgenauigkeit bei starken Defokussierung ist jedoch im Vergleich zur Gradienten-

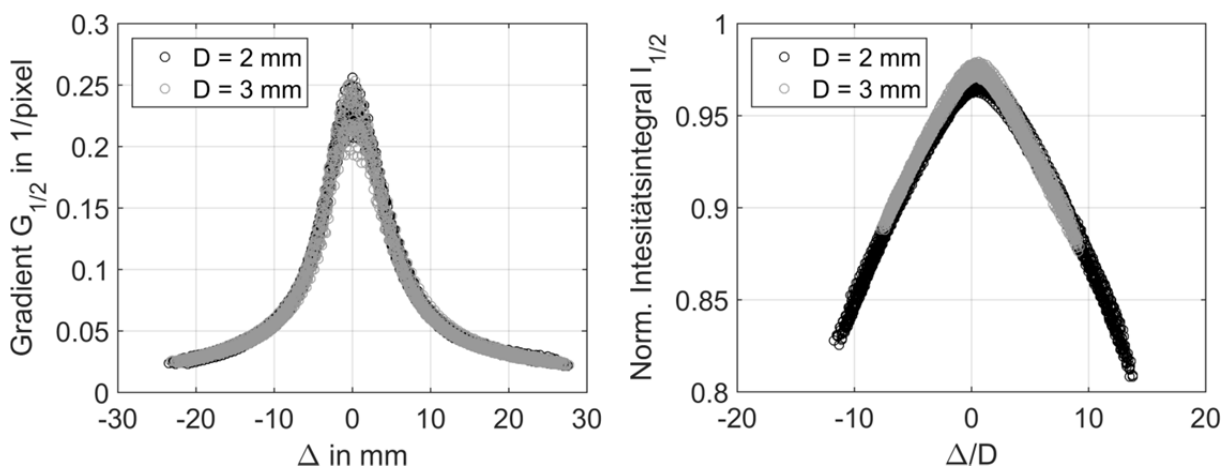


Abb. 4: Aus dem Kalibrierversuch ausgewertete Gradienten (links) und normierte Intensitätsintegrale (rechts); Messwerte der horizontalen und vertikalen Richtung wurden gemittelt.

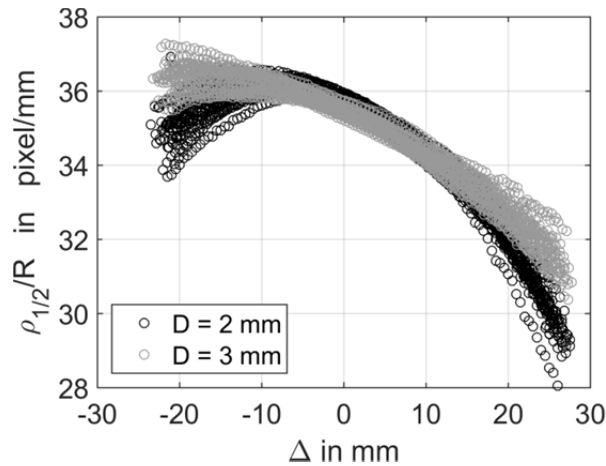


Abb. 5: Aus dem Kalibrierversuch ausgewertete Durchmesser bei halber Objektintensität bezogen auf die tatsächliche Größe.

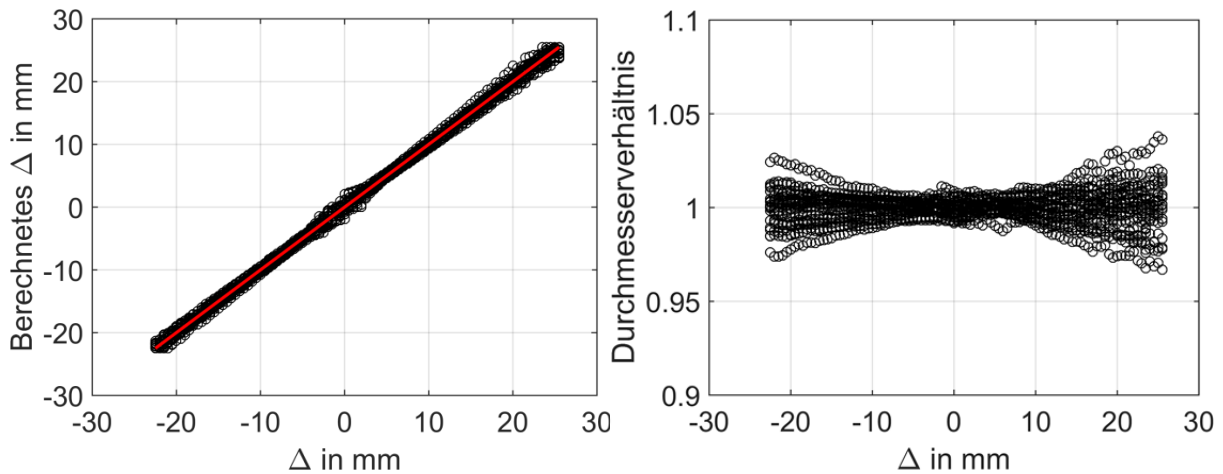


Abb. 6: Vergleich der aus $G_{1/2}$ berechneten Tiefenposition mit der tatsächlichen Tiefenposition (rechts) und der aus $\rho_{1/2}$ und $\hat{I}_{1/2}$ berechneten Scheibengröße bezogen auf den tatsächlichen Durchmesser von 3 mm (rechts).

tenmethode aufgrund des linearen Zusammenhangs mit der Tiefenposition etwas besser (vgl. Abb. 4). Wie in Abb. 6 zu erkennen ist, beträgt der Messfehler bei der Größenbestimmung im Fokusbereich etwa $\pm 1\%$ und bei stärkerer Defokussierung etwa $\pm 3\%$. Einen großen Beitrag zu dieser Messunsicherheit liefert – wie schon zuvor erklärt wurde – die Inhomogenität des Hintergrunds.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine Methode zur Bestimmung der 3D-Position und 2D-Größe von Blasen aus einem 2D-Bild einer einzelnen Kamera vorgestellt. Das Messprinzip beruht dabei auf der Auswertung der tiefenabhängigen (defokussierten) Intensitätsverteilung der Blasen-schattenabbildung. Es wurde der Einfluss des von der Blase zur Kamera gestreuten Lichts gezeigt und erläutert, welche Bedingungen bzgl. der Hintergrundbeleuchtung und des möglichen Messvolumens einzuhalten sind damit dieses Streulicht einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Messgrößen hat. Anhand von theoretischen Überlegung und experimentellen Untersuchungen mit lichtundurchlässigen Scheiben wurde die Mess- und Auswertemethodik

untersucht. Die Messergebnisse zeigen eine Messgenauigkeit bei der Tiefenpositionsbestimmung von insgesamt etwa $\pm 0,5$ mm bei einem Messbereich von etwa 50 mm für etwa 3 mm große Objekte. Die Genauigkeit der Größenbestimmung liegt hingegen zwischen $\pm 1\%$ im Fokus und $\pm 3\%$ bei stark defokussierten Abbildungen. Die Messgenauigkeit der einzelnen Messgrößen – vor allem die Größenbestimmung – ist stark an die Homogenität der Hintergrundbeleuchtung gebunden und kann daher noch verbessert werden.

In Folgearbeiten soll das Verfahren um eine Zylinderlinse im Strahlengang erweitert werden, wodurch zwei unterschiedliche Fokusebenen in horizontaler und vertikaler Richtung erzeugt werden (Astigmatismus). Durch Auswertung des 2D-Bildes in horizontaler und vertikaler Richtung kann eine eindeutige Bestimmung der Tiefenposition und Größe erfolgen. Bei der herkömmlichen Methode ist eine eindeutige Bestimmung nicht möglich, wodurch die Fokusebene am Rande des Messbereichs gelegt werden muss. Die Genauigkeit beider Verfahren soll in einem Versuch mit einer zweiten Kamera (senkrecht zur Tiefenrichtung) mit aufsteigenden Luftblasen untersucht werden.

Dankesworte

Dieses Projekt wurde im Rahmen der Emmy-Noether Nachwuchsgruppe CI-185/3 und des Schwerpunktprogramms SPP 1740 von der DFG gefördert. Wir bedanken uns auch bei Robert Schuster für seine Unterstützung im Labor.

Literatur

- Belden, J., Ravela, S., Truscott, T.T., Techet, A.H., 2012: "Three-dimensional bubble field resolution using synthetic aperture imaging: application to a plunging jet", *Experiments in Fluids*, 53, pp. 839-861
- Bongiovanni, C., Chevaillier, J. P., Fabre, J., 1997: "Sizing of bubbles by incoherent imaging: defocus bias", *Experiments in Fluids*, 23, pp. 209-216
- Bröder, D. und Sommerfeld, M., 2007: "Planar shadow image velocimetry for the analysis of the hydrodynamics in bubbly flows", *Measurement Science and Technology*, 18, pp. 2513-2518
- Cierpka, C., Segura, R., Hain, R., Kähler, C.J., 2010: "A simple single camera 3C3D velocity measurement technique without errors due to depth of correlation and spatial averaging for microfluidics", *Measurement Science and Technology*, 21, 045401
- Dehaeck, S., Van Parys, H., Hubin, A., van Beeck, J.P.A.J. 2009: "Laser marked shadowgraphy: a novel optical planar technique for the study of microbubbles and droplets", *Experiments in Fluids*, 47, pp. 333-341
- Fujiwara, A., Danmoto, Y., Hishida, K. Maeda, M., 2004: "Bubble deformation and flow structure measured by double shadow images and PIV/LIF", *Experiments in Fluids*, 36, pp. 157-165
- Geißler, P. und Jähne, B., 1996: "A 3D-sensor for the measurement of particle concentration from image sequences", *Proc. 18th Int. Congr. for Photogrammetry and Remote Sensing, Int. Arch. Photogr. and Remote Sensing*, 31, pp.194-199
- Haase, K., Baczymalski, D., Cierpka, C., Kähler C.J., 2015: „Charakterisierung von Blasen und deren Nachlauf in turbulenter Grundströmung“, Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 08.-10.09.2014, Dresden, Germany
- Honkanen, M., Saarenrinne, P., Stoor, T., Niinimäki, J., 2005: "Recognition of highly overlapping ellipse-like bubble images", *Measurement Science and Technology*, 16, pp. 1760-1770
- Jähne, B. und Geißler, P., 1994: "Depth from focus with one image", *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.713-717
- Klinner, J. und Willert, C., 2012: "Tomographic shadowgraphy for three-dimensional reconstruction of instantaneous spray distributions", *Experiments in Fluids*, 53, pp. 531-543
- Pereira, F., Gharib, M., Dabiri, D., Modarress, D. 2000: "Defocusing digital particle image velocimetry: a 3-component 3-dimensional DPIV measurement technique. Application to bubbly flows", *Experiments in Fluids*, 29, pp. 5078-5084