Experimentelle Untersuchung von Geschwindigkeitsprofilen in einer Taylor-Couette-Mehrphasenströmung mittels Ultraschall-Doppler-Messtechnik und Particle Image Velocimetry

Experimental investigation of velocity profiles in a Taylor-Couette multiphase flow using ultrasonic Doppler measurement technology and particle image velocimetry

D. Klembt, H. Meironke

Hochschule Stralsund, Zur Schwedenschanze 15, 18435 Stralsund

Ultraschall-Doppler-Messtechnik, Particle Image Velocimetry, Taylor-Couette-System, Zweiphasenströmung

Ultrasonic Doppler Velocimetry, Particle Image Velocimetry, Taylor-Couette System, Two-phase flow

Zusammenfassung

Für die messtechnische Erfassung von Geschwindigkeitsprofilen und -feldern, in biologisch sensiblen Medien, hat sich in vergangenen Untersuchungen [1] das berührungslose Ultraschall Doppler Verfahren (UDV) bewährt. Entsprechen wurde für die präzise Messung von Geschwindigkeitsprofilen in trüben und mehrphasigen Strömungen ein spezielles System zur Abstimmung und Bewertung der Messeigenschaften der Ultraschall-Transducer entwickelt. Zielstellung des Systems ist die systematische, reproduzierbare Herstellung einer Grundströmung, die mittels eines rotierenden Zylinders in dem Ringspalt erzeugt wird. Die sich einstellende Taylor-Couette-Strömung hat die Eigenschaft, dass sie sehr stabile Strömungstopologien erzeugt, mit einem großen Geschwindigkeitsspektrum. Durch die Rotationsgeschwindigkeit des Zylinders kann man den Messbereich der Transducer gezielt untersuchen. Diese Untersuchung wird, ergänzend zu früheren Untersuchungen im Blasenturm [2], den Einfluss von Gasblasen in einer dynamisch rotierenden Strömung auf die UDV-Messtechnik abbilden. Vorgestellt werden experimentelle Versuche mit der Ultraschall-Doppler-Messtechnik und der Particle Image Velocimetry. Resultierend werden aus den Ergebnissen weitere Aussagen zum Verhalten der UDV-Messtechnik in dieser Strömungskonfiguration abgeleitet.

Einleitung

Im Rahmen der Untersuchungen von Mehrphasenströmungen in biologischen Medien muss gerade die Messtechnik zuverlässig sein. Aufgrund der starken Trübung der Mehrphasenflüssigkeit ist die Messung von Geschwindigkeitsprofilen kompliziert. Optische Messverfahren wie die Particle Image Velocimetry (PIV) oder die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) können aufgrund der Trübung nicht eingesetzt werden. Aus diesem Grund wird die Messung mit akustischer Messtechnik mithilfe der Ultraschall-Doppler-Velocimetry (UDV) durchgeführt. Bei diesem Verfahren werden Ultraschalltransducer zur berührungslosen Messung von Geschwindigkeitsfeldern in Flüssigkeiten eingesetzt. Die Ergebnisse früherer Projekte zeigen, dass die Messsignale der verwendeten Ultraschallwandler von vielen Faktoren beeinflusst werden können. Um die Ergebnisse der Transducer zu verifizieren und die vorhandenen Unsicherheiten zu untersuchen, ist eine Strömungskonfiguration mit einem stabilen, reproduzierbaren Strömungsmuster erforderlich. Eine mögliche Strömungskonfiguration, die diese Bedingungen erfüllt, ist die Taylor-Couette-Strömung [3]. Der Vorteil dieser Strömung ist der relativ einfache Versuchsaufbau. Das System besteht aus einem inneren und einem äußeren Zylinder, in denen sich einer der beiden Zylinder mit einer bestimmten Geschwindigkeit dreht. In der Praxis werden solche Systeme als Rotationsviskosimeter oder in der chemischen Verfahrenstechnik als Taylor-Couette-Reaktor eingesetzt. Taylor-Wirbel bilden sich, wenn die Geschwindigkeit des inneren Zylinders erhöht wird. Die Folge der schnelleren Rotation ist, dass die Flüssigkeit in der Nähe des Innenzylinders eine größere Zentrifugalkraft erhält als die langsamere Strömung im äußeren Teil des Spaltes. Geoffrey I. Taylor beobachtete 1923, dass sich ab einer bestimmten Reynoldszahl torusförmige Wirbel der Grundströmung überlagern [4]. Entlang der Rotationsachse treten diese Wirbel im gleichen Abstand, aber mit wechselnder Drehrichtung auf. In den ersten Studien mit diesem Versuchsaufbau wird zur besseren Beurteilung des Signalverhaltens ein transparentes Modellfluid verwendet. Zusätzlich zu den akustischen Profilmessungen werden simultane Messungen mittels optischer Messtechnik durchgeführt und schließlich die gemessenen Geschwindigkeitsprofile verglichen.

Aufbau, Inbetriebnahme und Funktion

Für die Untersuchung der UDV-Messung wurde das Referenzsystem für verschiedene optische Messtechniken (PIV und LDA) optimiert. Die endgültige Variante des Taylor-Couette-Systems ist für die Messung mit dem PIV entwickelt worden. Dieser Versuchsstand benötigt gegenüber der LDA-Messung für die zweidimensionale Messung mit dem PIV eine Brechungsindexanpassung. Der überarbeitete Versuchsstand ist in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Zweiter Versuchsaufbau der Taylor-Couette-Strömung

Der innere (2) und äußere (3) Zylinder sind die wichtigsten strukturellen Teile des Taylor-Couette-Systems, da sie für die Erzeugung der Taylor-Couette-Strömung wesentlich sind. Der Innendurchmesser des Außenzylinders beträgt 100 mm und der Außendurchmesser des Innenzylinders 70 mm. Die Breite des Spaltes beträgt somit 15 mm. Die Wandstärke des Außenzylinders beträgt 5 mm. Der Innenzylinder ist 10 mm kleiner als der Außenzylinder, um einen gewissen Abstand zum Boden und zum Deckel einzuhalten, damit eine Rotation möglich ist. Der Deckel (1) bietet eine Montagemöglichkeit für die Ultraschalltransducer und eine zusätzliche Kapselung. Außerdem wird eine weitere Führung eingesetzt, die das Verschieben der Transducer relaubt. Auf diese Weise lässt sich die Position der Transducer relativ zum

Spalt verändern, um eine optimale Messposition zu definieren. Gleichzeitig ist sichergestellt, dass in einem Winkel von 90° zur Strömung gemessen wird. Die Taylor-Couette-Zelle wird von vier Acrylglasscheiben umgeben. Das auf diese Weise geformte Becken kann mit einem Fluid zur Korrektur der Brechung des Laserlichts befüllt werden. Als Versuchsfluid wird ein Gemisch aus 60 Massenprozent Glyzerin und 40 Massenprozent destilliertem Wasser sowie ausgewählten Tracerpartikeln (für UDV und PIV) verwendet.

Taylor-Couette-Strömung

Einen ähnlichen Versuchsaufbau, allerdings zur Viskositätsmessung, verwendete Maurice Marie Alfred Couette, aus diesem Grund wird die Grundform der resultierenden Strömung als Couette-Kreislauf bezeichnet. Wenn sich der Innenzylinder langsam dreht, kann die Strömung als eine flache laminare Strömung - die Couette-Strömung - beschrieben werden. In dieser einfachen Scherströmung strömt eine Flüssigkeit zwischen zwei parallelen flachen Wänden, die sich relativ zueinander bewegen (siehe Abbildung 2). Die Flüssigkeit wird aufgrund der Adhäsionsbedingung und der Reibung bewegt. Trägheitskräfte können vernachlässigt werden und Druck- und viskose Kräfte sind im Gleichgewicht, sodass die Couette-Strömung als eine exakte Lösung der Navier-Stokes-Gleichung dargestellt werden kann. Taylor-Wirbel entstehen, wenn die Geschwindigkeit des inneren Zylinders erhöht wird (siehe Abbildung 3). Aufgrund der schnelleren Rotation erhalten die Flüssigkeitspartikel in der Nähe des inneren Zylinders eine größere Zentrifugalkraft als die langsameren Partikel im äußeren Teil des Spaltes.





Abbildung 2: Schematische Darstellung einer zylindrischen Couette-Strömung

Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Taylor-Couette-Strömung nach Koerfer [5]

Dies entspricht einer instabilen Schichtung eines leichteren Mediums unter einem schwereren (Inversion). Entlang der Achse treten diese Wirbel in gleicher Entfernung, aber mit wechselnder Drehrichtung auf.

Messung der Geschwindigkeiten mittels UDV

Die Ergebnisse der fünf ausgewählten Messungen bei einer Drehzahl von 40 Umdrehungen pro Minute sind in Abbildung 4 dargestellt. Der dargestellte Kurvenverlauf einer Messung entspricht einer Mittelung über 1024 Werte für jedes der 102 Messvolumen. Die Temperatur des Fluides lag bei den ersten zwei Messreihen bei 22,3 °C und stieg für die folgenden Messungen um 0,1 K an. Dieser Wert liegt innerhalb der Messtoleranz des verwendeten Systems und der mögliche Einfluss dieser Temperaturerhöhung auf die Vergleichbarkeit der Messwerte wird als vernachlässigbar eingestuft. Die Abbildung 4 zeigt weiterhin einen periodischen Wechsel von Zuströmen (Bewegung in Richtung des Transducers, negative Messwerte) und Abströmen (Bewegung vom Transducer weg, positive Messwerte). Dieses Verhalten wird durch die gegenläufigen Wirbelzellen in der Strömung hervorgerufen. Es sind in der Abbildung 4 somit sieben Wirbelzellen dargestellt, wobei die Wirbelzelle bei einer Eindringtiefe von etwa 100 mm deformiert ist. Innerhalb des Bereiches **1** befindet sich die sogenannte Fresnelzone, in welcher starke Interferenzen entstehen können, welche die Messwerte verfälschen. Das Messfenster beginnt bei 17,05 mm Eindringtiefe. Es ist somit sichergestellt, dass die erhaltenen Messwerte nicht durch die in der Fresnelzone auftretenden Interferenzen beeinträchtigt sind.



Abbildung 4: Unterteilung der fünf UDV-Messungen bei 40 U/min in 4 Bereiche

Die Messwerte im Bereich 2 befinden sich im Bereich der Eindringtiefe zwischen 17,05 mm und ca. 95 mm. Innerhalb dieses Bereiches weisen die Daten eine geringe Streuung (maximale Standardabweichung von 0.37) auf. Es lassen sich jedoch einige Auffälligkeiten feststellen. So sind die Beträge der Geschwindigkeiten in den Scheitelpunkten nicht gleich groß. Die höchste im positiven Bereich gemessene Geschwindigkeit liegt bei 38,67 mm/s, im negativen Bereich sind es dagegen -34,49 mm/s. Weiterhin fällt auf, dass die Geschwindigkeiten an den Scheitelpunkten mit zunehmender Eindringtiefe abnehmen. Hier besteht ein Zusammenhang mit der Mittelwertbildung in den einzelnen Messvolumina. Der ausgegebene Geschwindigkeitsmittelwert unterliegt einem Integrationsfehler, dessen Größe abhängig von der Größe des Messvolumens (bei der UDV) ist. Besitzt das erste Messvolumen im vorliegenden Fall noch ein Volumen von rund 27 mm³, so besitzt das letzte Messvolumen bereits ein Volumen von rund 113 mm³. Nimmt man nun an, dass die Tracerpartikel ideal im Fluid verteilt sind, so empfängt das Messgerät aus dem letzten Messvolumen etwa viermal so viele Echos verglichen mit dem ersten. Auf diese Weise lässt sich das graduelle Sinken der gemessenen Geschwindigkeit erklären. Weiterhin fallen die "Spitzen" auf, welche sich in den Bereichen 3 und 4 befinden. Um eine Vorstellung von der Position dieser Anomalien im Spalt zu erlangen, wurde die Darstellung der Messwerte in eine maßstabsgetreue Abbildung des Versuchsaufbaus aus den CAD-Daten übertragen. Auf diese Weise erkennt man, dass die Bereiche 3 und 4 nahe am Boden der Taylor-Couette-Zelle liegen. In Abbildung 4 sind zusätzlich abwechselnd gleichlange rote und blaue Linien auf der x-Achse eingefügt. So erkennt man, dass die Wellenlänge der Wirbel im Bereich 2 nahezu identisch ist. Im Bereich 3 wird ein negativer Messwert, also ein Strömen auf den Transducer zu, ausgegeben. Die Wellenlänge ist jedoch verglichen mit den restlichen Wirbelzellen deutlich geringer. Es ist denkbar, dass von dem Bereich unter dem Innenzylinder aus eine Aufwärtsströmung ausgeht, welche die unterste Wirbelzelle überlagert und deformiert. Die Anomalie im Bereich 4 befindet sich in geringem Abstand zum Boden der Taylor-Couette-Zelle. Es ist vorstellbar, dass Reflexionen am Boden der Unterseite des Innenzylinders und dem Außenzylinder entstehen und so die Messwerte beeinflussen. Die Messreihen der Ultraschall-Doppler-Messtechnik bei einer Drehzahl von 80 Umdrehungen pro Minute zeigen qualitativ einen ähnlichen Verlauf. Es fällt jedoch auf, dass in dem vormals als Bereich 3 bezeichneten Bereich der Einfluss der vermuteten Strömung vom Boden der Zelle aus geringer ist. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Wirbelzellen mit steigender Reynoldszahl stabiler werden, wie Akonur und Lueptow 2003 feststellten [6]. Die Untersuchung hat auch ergeben, dass die gemessene Geschwindigkeit nahezu linear mit der Drehzahl korreliert. Eine Verdopplung der Drehzahl des Innenzylinders bewirkt auch näherungsweise eine Verdopplung der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit. Weiterhin fällt auf, dass sich die Bereiche, an denen eine Nullgeschwindigkeit gemessen wird, verschieben. Diese Bereiche können als der Grenzbereich zwischen zwei benachbarten Wirbelzellen verstanden werden, an denen keine Strömung in axialer Richtung stattfindet. Der Versatz dieser Bereiche findet jedoch nicht gleichmäßig statt. Somit ist es denkbar, dass sich die Größe der Wirbelzellen für eine Drehzahl von 80 Umdrehungen pro Minute leicht verändert. Das würde den Beobachtungen von Wereley und Lueptow entsprechen, die dieses Verhalten bei einer welligen Wirbelströmung beobachteten [7].

Vergleich der PIV- und UDV-Messungen

Im Folgenden sollen nun die Ergebnisse beider Messtechniken miteinander verglichen werden. Die Messwerte der Particle Image Velocimetry bilden bedingt durch den verwendeten Ausschnitt nur einen Teil der Strömung im untersuchten Bereich ab. Für einen Vergleich ist somit auch nur der entsprechende Ausschnitt der UDV-Messung relevant. Dieser Bereich ist zusammen mit der UDV-Messung in der Abbildung 5 dargestellt. In einem ersten Schritt wurde das Zuströmen und Abströmen auf den Transducer untersucht und ebenfalls in Abbildung 5 dargestellt. Die Folge aus Zuströmen, Abströmen und erneutem Zuströmen entspricht den Vorzeichen der Messwerte der UDV im betrachteten Bereich und erscheint somit plausibel. Ein direkter Vergleich der Messwerte beider Messtechniken ist dadurch erschwert, dass die Ultraschall-Doppler-Messtechnik nur eine Komponente des Geschwindigkeitsvektors erfassen kann. Im Durchschnitt sind bei der Particle Image Velocimetry etwas höhere gemessene Geschwindigkeiten zu erwarten, da im Gegensatz zur UDV keine Mittelung der Werte (außerhalb des "interrogation spot") erfolgt. Der höchste mittels Particle Image Velocimetry gemessene Geschwindigkeitswert bei einer Drehzahl von 40 Umdrehungen pro Minute liegt bei 56,18 mm/s. Der entsprechende Vektor befindet sich aber im Bereich starker Geschwindigkeitsgradienten zwischen zwei Wirbelzellen und besitzt eine radiale Richtung. Diese Richtungskomponente lässt sich mit der Ultraschall-Doppler-Messtechnik im verwendeten Versuchsaufbau jedoch nicht messen. Eine Möglichkeit für einen Vergleich ist die Betrachtung der Geschwindigkeitskomponente v des Geschwindigkeitsvektors, deren Richtung mit der Strahlachse des Transducers übereinstimmt. Auf die PIV-Messung angewendet, ergibt sich ein Maximalwert für ein Zuströmen von 38,96 mm/s und ein Maximalwert für ein Abströmen von 39,32 mm/s. Diese Werte stimmen in guter Näherung zu den mittels der UDV festgestellten Maximalwerten von 33,53 mm/s für ein Zuströmen und 36,75 mm/s für ein Abströmen überein. Die etwas größer gemessenen Geschwindigkeiten der Particle Image Velocimetry werden der Mittelung der Messwerte durch die Ultraschall-Doppler-Messtechnik zugeschrieben. Es ist festzustellen, dass beide Messtechniken im betrachteten Bereich eine etwas größere Abströmgeschwindigkeit ermitteln.



Abbildung 5: Relevanter Bereich für den Vergleich der UDV und PIV Messtechnik bei 40 U/min

Die Auswertung der Daten für eine Drehzahl von 80 Umdrehungen pro Minute erfolgte analog zu dem beschriebenen Vorgehen. Die maximal mit der UDV gemessene Zuströmgeschwindigkeit beträgt 75,38 mm/s, die maximale Abströmgeschwindigkeit 78,94 mm/s. Der Maximalwert der Particle Image Velocimetry für ein Abströmen beträgt 83,89 mm/s und liegt somit in guter Näherung zu den mit der UDV gemessenen Werten. Der Maximalwert für ein Zuströmen liegt aber bei 80,77 mm/s. Ein abschließender Vergleich der maximal gemessenen Geschwindigkeiten beider Messtechniken entsprechend dem Zu- und Abströmen sowie die prozentuale Abweichung der Messwerte verdeutlicht, dass scheinbar ein Zusammenhang zwischen der Richtung der Strömung und der Abweichung der Messwerte beider Messtechniken besteht. Dies lässt sich für beide untersuchten Drehzahlen feststellen. Hier besteht ein Bedarf an weiterführenden Untersuchungen.

Untersuchungen der Taylor-Couette-Mehrphasenströmung

Die aus den vorherigen Kapiteln gewonnen Erkenntnisse über das Verhalten der Taylor-Couette-Einphasenströmung bilden die Grundlage zur Untersuchung der mit Gasblasen überlagerten Strömung und deren Einfluss auf die UDV. Es ließ sich beobachten, dass sich die Gasblasen entlang des Innenzylinders aufwärtsbewegten und sich innerhalb von zwei Wirbelzellen um diesen drehten. Dies deckt sich mit den Beobachtungen von Mehel et al. für Gasblasen der Größenordnung von einigen Millimetern [8]. Weiterhin konnte beobachtet werden, dass es scheinbar eine Obergrenze von etwa vier Gasblasen pro Wirbelzelle gibt. Wird diese überschritten, so verlässt eine Gasblase die Wirbelzelle und steigt auf. Es ist aus der Literatur bekannt, dass das Vorhandensein von Gasblasen in einer Taylor-Couette-Strömung sowohl einen Einfluss auf die Größe der Wirbelzellen selbst als auch die Strömungsgeschwindigkeit der Wirbelzellen hat [8, 9, 10]. Dieser Einfluss soll nachfolgend mit der Ultraschall-Doppler-Messtechnik untersucht werden. Die Abbildung 6 entspricht qualitativ den Messreihen ohne eine Überlagerung mit Gasblasen. Es sind auch hier sieben Wirbelzellen messbar, wobei die Wirbelzelle bei einer Eindringtiefe von etwa 100 mm ebenfalls deformiert ist. Auffällig ist jedoch, dass der Betrag der gemessenen Geschwindigkeiten größer ist als bei den Messungen der Einphasenströmung.



Abbildung 6: Mittelwerte aus 5 Messungen ohne eingebrachte Gasblasen (blau) und mit eingebrachten Gasblasen bei einem Volumenstrom von 16,3 ml/h (rot)

Mehel et al. stellten fest, dass die axiale Geschwindigkeitskomponente der Strömung durch die Anwesenheit von Gasblasen über die gesamte Spaltbreite eine höhere Turbulenz aufweist [8]. Weiterhin fällt auf, dass die Ausdehnung der deformierten Wirbelzelle bei einer Eindringtiefe von etwa 100 mm größer ist. Dies deckt sich mit den Beobachtungen von Mehel et al., die eine Vergrößerung der Wellenlänge der Wirbelzellen am Boden und eine Verringerung der Wellenlänge im oberen Spaltbereich feststellten [8]. Es ist zu erkennen, dass der deutlich höhere Anteil an Gasblasen im Spalt während der Messung nur einen geringfügigen Einfluss auf die gemessenen Geschwindigkeiten hat. Das gesamte Strömungsprofil ist jedoch um einige Millimeter in Richtung des Bodens der Taylor-Couette-Zelle verschoben, wobei sich die Größe der Wirbelzellen kaum ändert. Auffällig ist, dass in den Bereichen mit den höchsten Geschwindigkeiten, die größten Abweichungen zwischen den Messungen auftreten. Diese Bereiche entsprechen den Randbereichen der Wirbelzellen, welche sich am Innenzylinder befinden. Die Gasblasen steigen ebenfalls entlang der Oberfläche des Innenzylinders auf, wodurch sie diesen Bereich der Strömung beeinflussen könnten. Murai et al. beobachteten ein Beschleunigen im Uhrzeigersinn rotierender und Verzögern entgegen dem Uhrzeigersinn rotierender Wirbelzellen durch aufsteigende Gasblasen [9]. Dies könnte die Abweichungen der Messwerte erklären. Für den eingestellten Volumenstrom von 16,3 Millilitern pro Stunde durchläuft eine Gasblase den Ringspalt während der Messung. Bedingt durch das manuelle Starten der Messungen tritt ein leichter Zeitversatz auf, wodurch sich die Gasblase bei der Messung an unterschiedlichen Positionen befinden kann. Dadurch können die beschleunigenden und verzögernden Effekte an den verschiedenen Wirbelzellen in unterschiedlicher Höhe detektiert werden. Man erkennt, dass durch den erhöhten Volumenstrom die Abweichungen an den betrachteten Positionen größer werden. Vergleicht man die Messwerte mit den Werten für den geringeren eingebrachten Volumenstrom, so fällt auf, dass im Bereich des Zuströmens (Rotation

der Wirbel im Uhrzeigersinn) höhere Geschwindigkeiten und im Bereich des Abströmens (Rotation der Wirbel im Uhrzeigersinn) geringere Geschwindigkeiten gemessen werden. Es ist daher wahrscheinlich, dass die Wirbelzellen entsprechend ihrer Rotationsrichtung von aufsteigenden Gasblasen beeinflusst werden. Ab einer Drehzahl von 95 Umdrehungen pro Minute werden Gasblasen innerhalb der Wirbelzellen gefangen (Reynoldszahl ca. 736). Laut dem Stabilitätsdiagramm nach Andereck liegt hier eine wellige Wirbelströmung vor [11]. Für die Wirbelzellen Nummer 2 und 4 werden im Vergleich zu anderen Messungen deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten gemessen. Es handelt sich dabei jedoch um Wirbelzellen, welche entgegen dem Uhrzeigersinn rotieren. Diese sollten durch aufsteigende Gasblasen anhand der bisher erlangten Erkenntnisse gebremst werden. Es ist ebenfalls auffällig, dass die Wirbelzelle 2 über eine leicht vergrößerte Ausdehnung in axialer Richtung besitzt. Es ist also denkbar, dass die gemessenen Abweichungen durch den Einfluss einer Gasblase hervorgerufen wird, welche sich innerhalb einer Wirbelzelle befindet und dadurch die wellige Wirbelströmung beeinflusst. Eine Ausdehnung der Wirbelzellen in axialer Richtung durch die Anwesenheit von Gasblasen in der Strömung, wurde in den Untersuchungen anderer Autoren bereits festgestellt [8, 9]. Eine sich innerhalb einer Wirbelzelle befindliche Gasblase reduziert jedoch nach den Erkenntnissen von Fokua et al. die Geschwindigkeit einer Wirbelzelle [10]. Aus diesem Grund wird vermutet, dass hier ein direkter Einfluss der Gasblasen auf die Ultraschall-Doppler-Messtechnik vorliegt. Man erkennt, dass bei dem höheren Volumenstrom der Gasphase die Messwerte zwischen den fünf Messungen stark fluktuieren. Dies gilt sowohl für den Betrag der gemessenen Geschwindigkeit als auch für das Messvolumen, welches diese detektiert. Erst im Bodenbereich bei einer Eindringtiefe von circa 103 mm erkennt man bei allen Messungen wieder vergleichbare Werte. Bei dieser Drehzahl ließ sich beobachten, dass sich im Gegensatz zu den Untersuchungen mit einem geringeren Volumenstrom Gasblasen in zwei Wirbelzellen sammelten. Anhand der Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen bei identischer Drehzahl sowie der Ergebnisse anderer Autoren aus der Literatur wird geschlussfolgert, dass die starken Abweichungen zwischen den Messwerten durch die Gasblasen hervorgerufen werden. Verglichen mit der mittleren Größe der Tracerpartikel zwischen 80 und 200 µm ist der Durchmesser der Gasblasen von etwa 3 mm sehr groß. Die maximale Partikelgröße für die vorliegenden Versuchsbedingungen liegt bei 454,75 µm. Es ist daher denkbar, dass Brechung und Reflexionen des Ultraschall-Pulses an den Gasblasen auftreten, wodurch sich dessen Richtung und Intensität ändern. Die daraus resultierenden Antwortsignale können dann von der Messtechnik nicht mehr korrekt ausgewertet werden.

Zusammenfassung der Untersuchung

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde eine Taylor-Couette-Strömung in einem 60-prozentigem Glyzerin-Wasser-Gemisch untersucht. Die Strömung wurde in einem Bereich von Reynoldszahlen zwischen 3 und 777 untersucht. Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit wurde mit der Ultraschall-Doppler-Messtechnik ein akustisches Verfahren verwendet. Die Grundfrequenz der verwendeten Transducer lag bei 4 MHz bzw. 2 MHz. Die Messwerte der Ultraschall-Doppler-Messtechnik in der Taylor-Couette-Strömung wurden durch optische Referenzmessungen mit dem PIV überprüft. Die maximal detektierten Geschwindigkeiten beider Messtechniken befinden sich dabei in einer vergleichbaren Größenordnung. Die Messwerte der Particle Image Velocimetry liegen dabei unabhängig von der Drehzahl zwischen 0,8 % bis 6,54 % über den Messwerten der Ultraschall-Doppler-Messtechnik im Bereich des Abströmens. Im Bereich des Zuströmens steigt die Abweichung zwischen den Messwerten beider Verfahren auf 1,8 % bis 14 %. Die Messungen mit den 2 MHz-Transducern waren wesentlich präziser und hatten eine Abweichung zwischen den Messwerten beider Verfahren von maximal 2,98 % beim Zuströmen und 1,13 % Prozent beim Abströmen. Im Allgemeinen bestand eine gute qualitative Übereinstimmung zwischen den Messungen und den Strukturparametern der Taylor-Wirbel, die sehr gut erfasst werden konnten. Im Anschluss an die Untersuchungen der einphasigen Taylor-Couette-Strömung wurde durch das Einbringen von Gasblasen mit einer Größe von circa 3 mm eine mehrphasige Taylor-Couette-Strömung erzeugt und untersucht. Es ließ sich feststellen, dass die Gasblasen mit steigender Drehzahl des Innenzylinders immer weiter aus ihrer Aufstiegsbahn ausgelenkt werden. Ab einer Drehzahl von 95 Umdrehungen pro Minute können Gasblasen innerhalb von Wirbelzellen lokalisiert werden, die um den Innenzylinder rotieren. Für die Drehzahlen 40 und 80 Umdrehungen ließ sich eine Beeinflussung der Strömung durch Gasblasen an den Randbereichen der am Innenzylinder gelegenen Wirbelzellen beobachten. Die aufsteigenden Gasblasen können in Abhängigkeit der Rotationsrichtung die Strömungsgeschwindigkeit der Wirbelzellen beeinflussen. Es zeigte sich, dass im Uhrzeigersinn rotierende Wirbelzellen höhere und entgegen dem Uhrzeigersinn rotierende Wirbelzellen beinflussen, wenn Gasblasen entlang des Innenzylinders aufsteigen. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass Gasblasen, welche sich innerhalb der Wirbelzellen um den Innenzylinder drehen, nicht nur einen Einfluss auf die Taylor-Couette-Strömung, sondern auch auf die Ultraschall-Doppler-Messtechnik haben.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die UDV-Messtechnik (GHS-15-0050, GHS-17-0021) durch den "Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung" (EFRE) und der PIV-Messtechnik (GZ: INST 295/32-1 LAGG) bei der "Deutschen Forschungsgemeinschaft" (DFG).

Literatur

- [1] D. Klembt und H. Meironke, "Experimental investigations of the influence of different bottom shapes on the temperature and velocity fields in a fermentation tank with a biological multiphase flow," Berlin: Proc. 11. International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, 2018.
- [2] D. Klembt, H. Meironke und A. Delgado, "Untersuchungen zum Einfluss von Blasenschwärmen und -säulen auf die Ultraschall Doppler Messtechnik," GALA e.V. - Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie - 27. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", pp. 11.1-11.9, 2019.
- [3] Y. Takeda, W. E. Fischer, J. Sakakibara und K. Ohmura, "Experimental observation of the quasiperiodic modes in a rotating Couette system.," *Physical review. E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics.,* pp. 4130-4134, 1993.
- [4] G. I. Taylor, "Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders," *Proceedings* of *Royal Society London*, 1923.
- [5] S. Körfer, "Der Einfluss von laminaren Strömungen und Sekundärströmungen im Taylor-Couette-System auf die Thrombozyten," Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2002.
- [6] A. Akonur und R. M. Lueptow, "Three-dimensional velocity field for wavy Taylo-Couette flow," *Physics of Fluids,* pp. 947-960, 2003.
- [7] S. T. Wereley und R. M. Lueptow, "Spatio-temporal character of non-wavy and wavy Taylor– Couette flow," *Journal of Fluid Mechanics*, p. 59–80, 1998.
- [8] A. Mehel, C. Gabillet und H. Djeridi, "Analysis of the flow pattern modifications in a bubbly Couette-Taylor flow.," *Physics of Fluids,* pp. 18101-1 - 18101-4, 2007.
- [9] Y. Murai, H. Oiwa und Y. Takeda, "Bubble behavior in a vertical Taylor-Couette flow.," *Journal of Physics: Conference Series,* pp. 43-156, 2005.
- [10] G. Fokoua, C. Gabillet und C. Colin, "Experimental study of bubble-drag interaction in a Taylor-Couette flow," 8th International Conference on Multiphase Flow ICMF, pp. 1-11, 2013.
- [11] C. D. Andereck, S. S. Liu und H. L. Swinney, "Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders," *Journal of Fluid Mechanics,* p. 155–183, 1986.