

Experimentelle Untersuchung der Beeinflussung von Blasen- schwärmen und -säulen auf die Ultraschall Doppler Messtechnik mittels laseroptischer Methoden

Experimental investigation of the influence of bubble swarms and columns on the Ultrasonic Doppler Measurement technique with laser-optical methods

D. Klemmt¹, H. Meironke¹, A. Delgado²

¹Hochschule Stralsund, Zur Schwedenschanze 15, 18435 Stralsund

²Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Cauerstraße 4, 91058 Erlangen

Ultraschall Doppler Messtechnik, Particle Image Velocimetry, Zweiphasenströmung
Ultrasonic Doppler Velocimetry, Particle Image Velocimetry, Two-phase flow

Zusammenfassung

Zur Untersuchung des Einflusses von Blasenschwärmen und -säulen auf die Ultraschall Doppler Messtechnik (UDV) werden die wesentlichen, theoretischen Grundlagen aufbereitet und zusammenfassend dargestellt. Weiterhin wird an einem Versuchsstand, der speziell für die strömungsmechanische Untersuchung einer Zweiphasenströmung konstruiert wurde, eine umfangreiche experimentelle Untersuchung vorgenommen. Vorgestellt werden experimentelle Versuche mit dem UDV und der Particle Image Velocimetry (PIV). Zusätzlich wird in dieser Arbeit der Einfluss von Blasenschwärmen und -säulen auf verschiedene Basisfrequenzen der Ultraschall Transducer untersucht. Resultierend werden aus den Ergebnissen, Aussagen zum Umgang mit aufsteigenden Einzelblasen, Blasensäulen und Blasenschwärmen getroffen und eine Reduzierung bzw. Vermeidung von Geschwindigkeitsmessfehlern erläutert.

Einleitung

Für die gezielte und systematische Untersuchung des Impuls-, Wärme- und Stofftransportes in einer Mehrphasenströmung wird zum Beispiel der Fermentationsprozess von Bier, in Zusammenarbeit mit der lokalen Brauerei erforscht [1]. Für die Untersuchung steht ein modularer 350 Liter Fermenter mit umfangreicher Strömungs- und Temperaturmesstechnik zur Verfügung. Damit kann unter anderem der Einfluss der Hefe auf die Gärungsaktivität, die Hefeverteilung und die auftretenden Konvektionsphänomene untersucht werden.

Die Herausforderung bei der Untersuchung von biologisch aktiven, fermentierenden Flüssigkeiten (z. B. Hefe und Bierwürze) sind die vielen komplexen Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Phasen (Hefe als Feststoff, Kohlenstoffdioxidblasen als Gas, Würze als Flüssigkeit). Darüber hinaus werden natürliche Konvektionsprozesse durch aufsteigende Kohlenstoffdioxidblasen überlagert und die Flüssigkeit ist zusätzlich stark getrübt. In der Folge muss für die Untersuchung der Geschwindigkeitsfelder eine hohe Anforderung an die Messtechnik und die anschließende Auswertung gestellt werden. Aufgrund der hohen Trübung kann während des realen Gärprozesses die Messung der Geschwindigkeiten nur durch eine Messtechnik realisiert werden, die auf Grundlage der akustischen Messung basiert. Für die messtechnische Erfassung von Geschwindigkeitsprofilen und -feldern, in biologisch sensiblen Medien

hat sich in vergangenen Untersuchungen das berührungslose Ultraschall Doppler Verfahren (UDV) bewährt [1]. Schwierigkeiten bei der Messung mit der UDV-Messtechnik entstehen, wenn Gasblasen im Medium vorhanden sind. Ursache für das Vorhandensein von Gasblasen können, ein in der Flüssigkeit gelöstes Gas und/oder eine biologisch/chemische Reaktion sein, entsprechend häufig treten Gasblasen bei verfahrenstechnischen Prozessen auf.

Für eine gezielte wissenschaftliche Erforschung der Mehrphasenströmung müssen groß- und feinskalige Strömungsphänomene mithilfe der Ultraschall Doppler Messtechnik aufgelöst werden. In dem dafür benötigten Geschwindigkeitsmessfeld steigt mit zunehmender Diskretisierung allerdings die Wahrscheinlichkeit von Geschwindigkeitsmessfehlern, durch Gasblasen bzw. unterschiedliche Phasengeschwindigkeiten. In der Auswertung kann später nur in seltenen Fällen der Einfluss, aufsteigender Gasblasen auf das umgebene Fluid direkt ermittelt werden. In früheren Publikationen wurde bereits der Einfluss einzelner Gasblasen und homogener, zeitlich stabiler Blasensäulen auf die Ultraschall Doppler Messtechnik dargestellt [2, 3]. Diese Ergebnisse werden aufgegriffen, um nachfolgend den Einfluss von Blasenschwärmen und -säulen auf die Messtechnik mittels optischer Methoden zu untersuchen.

Theoretische Betrachtungen zur Interaktion zweier Phasen (gasförmig/flüssig)

Die in diesem Kapitel beschriebenen theoretischen Grundlagen beziehen sich auf die in der Gärung üblicherweise entstehenden Gasvolumenströme an CO_2 und den resultierenden Gasblasengrößen im Fermenter. Der Volumenstrom an CO_2 entspricht im Versuchsaufbau/Blasenturm einer Ablösefrequenz von $f \leq 2,4 \text{ Hz}$ bzw. $\dot{V} \leq 12 \text{ mm}^3/\text{s}$ (Einzelblasen und homogene, störungsfreie Blasensäulen) und die untersuchten Gasblasen haben eine variable Größe von $50 \mu\text{m} \leq d_B \leq 4 \text{ mm}$.

Gasblasen zeichnen sich durch eine bewegliche, deformierbare Kontaktfläche zwischen den Phasen aus, die zu einer starken Form- und Bewegungsdynamik führt. Im Gegensatz dazu besitzen starre Partikel eine feste, formstabile Phasengrenzfläche und damit eine strömungsunabhängige Form. Obwohl sich Gasblasen nur in wenigen Fällen wie feste Partikel verhalten, wird diese Annahme oft bei sehr kleinen Gasblasen angenommen. Weiterhin können auch größere Konzentrationen oberflächenaktiver Substanzen (Tenside, Tracer-Partikel) das Verhalten der Blase einem starren Partikel ähnlich erscheinen lassen. Im Unterschied zu festen sphärischen Partikeln können Gasblasen allerdings nicht nur ihre Form ändern, sondern ihre bewegliche Phasengrenze kann innerhalb der Blase Zirkulationsbewegungen induzieren, die wiederum einen Einfluss auf das Bewegungsverhalten der Blase ausüben können.

Nach Bhaga und Weber [4] nimmt in einer Zweiphasenströmung Luft/Wasser ($Mo=2,5 \cdot 10^{-11}$) die Aufstiegsgeschwindigkeit von Einzelblasen, relativ zur Flüssigkeit bis zu einem Durchmesser von 1,5 mm (fast perfekte Kugelform, Oberflächenspannung dominant, Viskosität vernachlässigbar) zu und sinkt danach wieder ab. Begründen lässt sich die sinkende Aufstiegsgeschwindigkeit mit der Änderung des Formwiderstandes. Denn ab 1,5 mm ändert sich die Blasenform und entspricht eher einem abgeflachten Rotationsellipsoid. Die Änderung der Blasenform lässt sich durch den steigenden Druck auf die Grenzfläche erklären.

Die Form der Blase wird dabei hauptsächlich durch die physikalischen Eigenschaften der Flüssigphase (Dichte, dynamische Viskosität, Oberflächenspannung) und die daraus resultierende Aufstiegsgeschwindigkeit bestimmt. Die Eigenschaften einer Flüssigkeit werden meist in der dimensionslosen Flüssigkeitskennzahl bzw. durch den Kehrwert der Morton-Zahl zusammengefasst (siehe Gl. (3)). In Abhängigkeit des Durchmessers, den Spannungsverhältnissen und einer eventuellen Beeinflussung durch das Nachlaufgebiet einer vorhergehenden Gasblase

kann die geometrische Form einer Gasblase in fünf Grundformen [5] eingeteilt, mithilfe der Eötvös-Zahl, Morton-Zahl und Reynoldszahl berechnet (siehe Gl. (1) bis (3)) und mittels eines Diagramms von Cliff et. al. [6] charakterisiert werden.

$$\text{Re} = \frac{u_{\text{rel}} \cdot d_b \cdot \rho_{\text{flüssig}}}{\eta_{\text{flüssig}}} \quad (1) \quad \text{Eo} = \frac{g \cdot (\rho_{\text{flüssig}} - \rho_{\text{gas}}) \cdot d_b^2}{\sigma} \quad (2) \quad \text{Mo} = \frac{g \cdot \eta_{\text{flüssig}}^4 \cdot (\rho_{\text{flüssig}} - \rho_{\text{gas}})}{\rho_{\text{flüssig}}^2 \cdot \sigma^3} \quad (3)$$

Die maximalen Aufstiegsgeschwindigkeiten nehmen bei den untersuchten periodisch stationären und stabilen Blasensäulen, ohne Neigung zur dreidimensionalen Ausbreitung mit der Ablösefrequenz zu und entsprechen damit den Ergebnissen von Miyahara und Yamanaka [7]. Je geringer dabei der Abstand zwischen den Gasblasen ist, desto größer ist auch die Beeinflussung durch die Anströmung der vorauslaufenden Gasblase.

Für die Beschreibung der Aufstiegsgeschwindigkeiten in Blasketten kann das Modell von Crabtree und Bridgwater [8] herangezogen werden. Danach kann die Geschwindigkeit einer Blasensäule durch die Aufstiegsgeschwindigkeit einer ungestörten Einzelblase, in einem unendlichen Gefäß und der Strömung der Wirbelschlepe, der vorauslaufenden Blase berechnet werden. Beachtet werden muss allerdings bei der Berechnung der Aufstiegsverlauf der Gasblasen. In der vorliegenden Untersuchung steigen die Blasensäulen durch die höhere Viskosität und die etwas geringere Oberflächenspannung von dem Glycerin-Wasser-Gemisch (ähneln den physikalischen Eigenschaften von Jungbier ohne Trübung) bis zu einer Ablösefrequenz von 14 Hz ($\dot{V} \leq 65 \text{ mm}^3/\text{s}$) nicht in einer zickzackförmigen oder helikalen Bahn auf und können folglich in Ketten berechnet werden.

Bei Ablösefrequenzen von über 15 Hz ($\dot{V} \geq 70 \text{ mm}^3/\text{s}$) ist allerdings auch der Aufstiegsverlauf von den Blasensäulen in dem Glycerin-Gemisch nicht mehr homogen sowie stabil und es bilden sich die ersten Blasenschwärme. Blasenschwärme lassen sich dabei als Teilvolumen einer Blasensäule auffassen. Innerhalb eines Blasenschwarms bewegen sich Gasblasen in ähnlichen Geschwindigkeiten und können deshalb als miteinander interagierende Einheit betrachtet werden. Diese Einheit muss aber nicht stabil sein und kann sich durch Zerfall oder Koaleszenz neu bilden. Die Größe und Stabilitätszeit eines Blasenschwarms wird entscheidend durch die Parameter der Blasensäule (Ablösefrequenz, Größe der Gasblasen, Parameter der Zweiphasenströmung, etc.) bestimmt. In der Regel nimmt mit zunehmender Ablösefrequenz die Größe des Blasenschwarms und die Stabilitätszeit ab.

Die Abb. 1 stellt ein Teilvolumen einer Blasensäule dar. Dieses Teilvolumen kann als exemplarischer Blasenschwarm in dieser Untersuchung zu einem Zeitpunkt $t=0$ gesehen werden. Die Abb. 2 stellt eine weitere Hochgeschwindigkeitsaufnahme, innerhalb der Interaktions- und Stabilitätszeit dieses ausgewählten Blasenschwarms zu einem späteren Zeitpunkt ($t=0,031 \text{ s}$) dar. Im direkten Vergleich der beiden Aufnahmen können Aussagen zur Interaktion der Einzelblasen innerhalb des Blasenschwarms getroffen werden. Grundsätzlich verringert sich die maximale Aufstiegsgeschwindigkeit einer Gasblase in einem Blasenschwarm gegenüber einer homogenen, stabilen Blasensäule. Nach Paaschen [9] findet innerhalb eines Blasenschwarms ein erhöhter Austausch von Fluidelementen zwischen den beiden Teilvolumina der flüssigen Phase statt, als dies bei Einzelblasen der Fall wäre. Aus diesem Grund eignen sich gerade in der Verfahrenstechnik Blasensäulen und Blasenschwärme für den konvektiven Mischungsmechanismus. Die Blaseschleppen die hauptsächlich für den Stofftransport verantwortlich sind, sind im Wesentlichen abhängig von der Reynolds-Zahl und der Oberflächenspannung und sollten aus diesem Grund für jedes Stoffgemisch ermittelt werden.

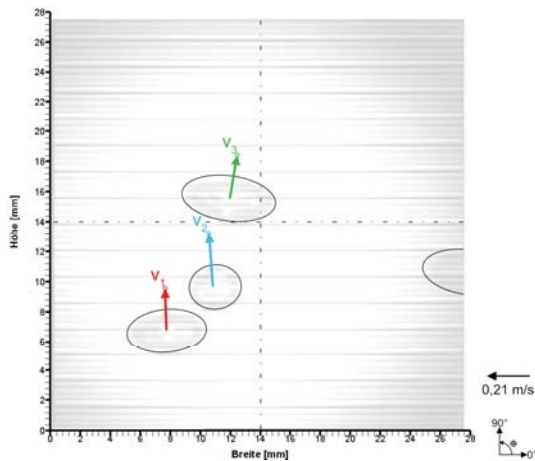


Abb. 1: Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines Blasenschwarms bei $t=0$ s

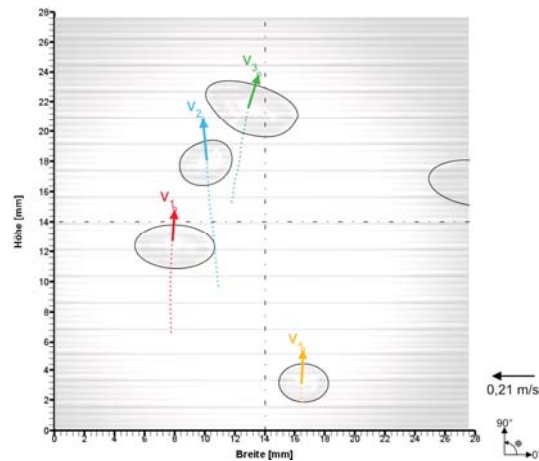
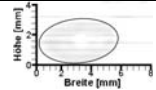
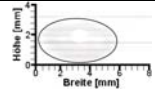
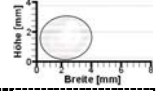
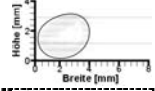
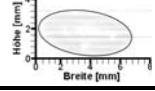
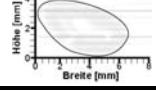


Abb. 2: Aufnahme des Blasenschwarms nach 31 ms mit Aufstiegsverläufen

Die Tab. 1 stellt die an der Blasenoberfläche detektierten Ergebnisse der Geschwindigkeit, Auslenkung und Formänderung von dem Blasenschwarm aus Abb. 1 und Abb. 2 dar.

Tab. 1: Auswertung der Geschwindigkeit, Auslenkung und Formänderung des Blasenschwarms

	Geschwindigkeit [m/s]		Auslenkung [°]		Formänderung [mm]	
	Abb. 1	Abb. 2	Abb. 1	Abb. 2	Abb. 1	Abb. 2
Blase 1	v_1 0,206	v_1 0,189	β_1 92,1	β_1 86,2		
Blase 2	v_2 0,266	v_2 0,216	β_2 93,9	β_2 95,2		
Blase 3	v_3 0,220	v_3 0,182	β_3 80,5	β_3 72,9		

Auffällig sind die Änderungen der Aufstiegsgeschwindigkeiten der interagierenden Blasen und die vergleichsweise hohen dreidimensionalen Auslenkungen, innerhalb eines Glycerin-Wasser-Gemisches. Weiterhin lässt sich ein Einfluss der Interaktion auf die bewegliche, deformierbare Phasengrenze feststellen und damit auch auf die Änderung der innerzirkularen Wirbel.

Grundlagen der UDV-Messtechnik

Die Ultraschall Doppler Messtechnik (engl. Ultrasonic Doppler Velocimetry, UDV) ist ein akustisches Verfahren, welches das berührungslose Erfassen von Geschwindigkeitsprofilen, entlang der Strahlachse der Ultraschall-Sonde (Transducer) in Strömungen ermöglicht [10]. Der Transducer emittiert einen Ultraschall-Puls mit definierter Basisfrequenz, der sich durch das Medium bewegt und dabei divergiert. Anschließend schaltet der Transducer direkt auf Empfang. Trifft der Ultraschall-Puls auf ein Partikel im Fluid, das eine bestimmte Größe unterschreitet, ist es in der Lage einen Teil der Pulsenergie zu absorbieren und sofort wieder in derselben Frequenz abzugeben. Das Partikel fungiert dabei als Rundstrahler, d.h. die Ultraschall-Welle breitet sich allseitig aus, unter anderem auch in Richtung des Transducers, die Ausbreitung entspricht damit dem Huygensschen Prinzip. Die Frequenz des Echos verschiebt sich entsprechend der vorhandenen Strömungsgeschwindigkeit (des Partikels) zur Doppler-Frequenz und erreicht den Transducer nach einer Laufzeit t . Von dem Transducer registriert, können anhand der Laufzeit, der Frequenzverschiebung und der Schallgeschwindigkeit des Mediums, eine gewichtete, mittlere Geschwindigkeit berechnet sowie ein definierter Abstand vom Transducer

zugeordnet werden. Das Aussenden, Empfangen und Auswerten wird für eine Vielzahl von Messvolumina entlang der Strahlachse durchgeführt.

$$t = \frac{2 \cdot x}{a} \text{ [s]} \quad (4) \quad v_x = \frac{a \cdot (f_T - f_0)}{f_T + f_0} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (5)$$

Aus den Gleichungen (4) und (5) kann ein Diagramm erstellt werden, auf denen die Geschwindigkeiten der Messvolumina dargestellt werden (siehe Abb. 3).

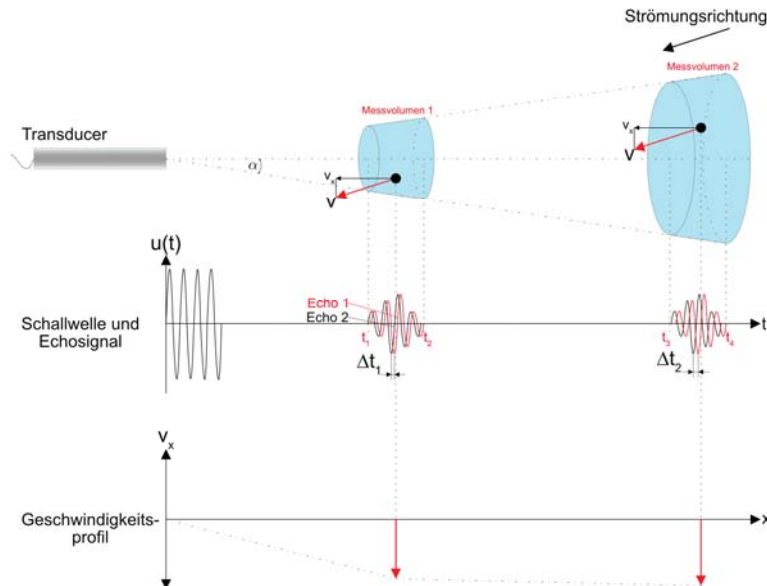


Abb. 3: Funktionsprinzip der UDV-Messtechnik (eigene Darstellung nach Eckert und Franke [11])

Für die jeweiligen Transducer mit unterschiedlichen Frequenzen ergeben sich verschiedene maximale Eindringtiefen, in denen noch eine qualitative Auswertung erfolgen kann. Der Bereich direkt nach dem Transducer wird als Fresnel-Zone bezeichnet, in dem keine Messungen möglich sind. In der anschließenden Fraunhofer-Zone weitet sich das Messfeld mit einem definierten Winkel (α) auf, sodass auch das Messvolumen stetig zunimmt. Das Produkt aus der maximalen Messtiefe (P_{\max}) und dem maximalen messbaren Geschwindigkeitsbereich (v_{range}) ist dabei konstant (siehe Gl. (6)).

$$P_{\max} \cdot v_{\text{range}} = \frac{a^2}{4f_0} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (6) \quad \Delta v = \frac{v_{\text{range}}}{256} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (7)$$

Folglich muss bei jeder Messung ein Kompromiss zwischen der maximalen Eindringtiefe, dem maximalen Geschwindigkeitsbereich und der maximal möglichen Geschwindigkeitsauflösung (siehe Gl. (7)) gefunden werden.

Für die Messungen in der vorliegenden Arbeit wurden Transducer mit einer Basisfrequenz von 2 und 4 MHz verwendet. Diese besitzen durch ihre Abstrahlcharakteristik eine Fresnel-Zone von 27,1 mm bzw. 13,5 mm, einen Austrittsdurchmesser des Ultraschalls (aktiver Durchmesser) von 10 mm bzw. 5 mm und einer sich ergebenden halben Strahldivergenz von $2,7^\circ$ entlang der Strahlachse. Tab. 2 stellt die Eigenschaften der verwendeten Transducer im Forschungstank und im Blasenturm dar.

Tab. 2: Eindringtiefe zum messbaren Geschwindigkeitsbereich

Frequenz	Einbauort	Eindringtiefe	Maximal messbarer Geschwindigkeitsbereich	Maximal mögliche Geschwindigkeitsauflösung
2 MHz	Blasenturm	700 mm	-304,3 bis +301,9 mm/s	2,38 mm/s
	Versuchstank	1150 mm	-185,2 bis +183,8 mm/s	1,45 mm/s
4 MHz	Blasenturm	700 mm	-152,1 bis +150,9 mm/s	1,19 mm/s
	Versuchstank			

Versuchsaufbau

Für die optische Untersuchung und quantitative Beschreibung des Einflusses von Blasen-schwärmen und -säulen auf die Ultraschall Doppler Messtechnik wird ein bestehender Ver-suchsstand [2, 3] verwendet und entsprechend angepasst (siehe Abb. 5). Ausgangspunkt ist ein 1 m hoher gläserner Behälter (zu 70% mit einem 60%igem Glycerin/Wasser-Gemisch ge-füllt) mit quadratischer Grundform (ca. 200 x 200 mm). Im Boden dieser Blasen-säule ist mittig eine kreisrunde Öffnung eingebracht, in dem fünf Stahl-Kapillaren mit einem Öffnungsdurchmesser von $d_K=0,8$ mm installiert wurden (siehe Abb. 4). Die gleichmäßige Generierung der Gasblasen und die Einstel-lung der Ablösefrequenz erfolgt mittels eines Druckspeichers, mehreren Nadelventilen, fünf Magnetventilen und einem Microcontroller. Die opti-sche Messung des Strömungsfeldes, um die Blasen-schwärme wird mit einem zwei- bis dreidimensionalen PIV-System durchgeführt. Ein Jus-tierungslaser an einer Linearverfahreinrichtung dient der exakten Posi-tionierung des PIV mit den Messvolumen der UDV-Technik.

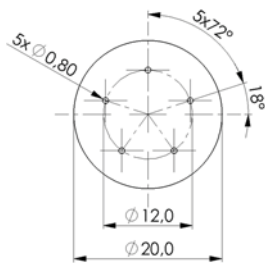


Abb. 4: Kapillareinsatz

Die Vermeidung von Überblendungen und die detaillierte Auflösung der Geschwindigkeitsfel-der an der Phasengrenze wird durch die Zugabe von fluoreszierenden Partikeln ($\rho=1050$ kg/m³, $d_P=1$ μ m) ermöglicht. Die Aufnahme der Strömungspartikel erfolgt anschlie-ßend mit einer Kreuzkorrelations-CCD-Kamera (Aufnahmefeld ca. 65 x 65 mm), bei einer Auf-lösung von 2048 x 2048 Pixeln. Durch einen opti-schen Filter wird nur das Streulicht der fluoreszie-renden Partikel von den Kameras erfasst. Die UDV-Geschwindigkeitsmesstechnik befindet sich im obe-ren Teil der Blasen-säule. Angebracht ist dort ein 2 und 4 MHz Transducer im zentralen Lot zum Kapil-lareinsatz. Durch einen weiteren Microcontroller wird die UDV-Messung mit der PIV-Messung, durch ein TTL-Signal zeitlich synchronisiert. Ermöglicht wird die Synchronisation durch eine zweifache Lichtschranke. Zusätzlich kann mithilfe der Licht-schranken auch die Aufstiegsgeschwindigkeit ein-zelner Gasblasen, die Ablösefrequenz und der Ab-stand zwischen Gasblasen gemessen werden. Wei-terhin ermöglicht eine Hochgeschwindigkeitska-mera die Einordnung der Blasen-schwärme und die Auswertung der Phasengrenze. Die für die UDV-Geschwindigkeitsauswertung benötigte Schallgeschwindigkeit wird periodisch mithilfe eines Laufzeitenverfahren im Blasenturm ermittelt und beträgt im Mittel ca. 1846 m/s (22,5 °C, 1 bar). Die Tab. 3 stellt die Stoffeigenschaften und die strömungsmechanischen Kennwerte des Gemisches/der Strömung dar.

Die Vermeidung von Überblendungen und die detaillierte Auflösung der Geschwindigkeitsfel-der an der Phasengrenze wird durch die Zugabe von fluoreszierenden Partikeln ($\rho=1050$ kg/m³, $d_P=1$ μ m) ermöglicht. Die Aufnahme der Strömungspartikel erfolgt anschlie-ßend mit einer Kreuzkorrelations-CCD-Kamera (Aufnahmefeld ca. 65 x 65 mm), bei einer Auf-lösung von 2048 x 2048 Pixeln. Durch einen opti-schen Filter wird nur das Streulicht der fluoreszie-renden Partikel von den Kameras erfasst. Die UDV-Geschwindigkeitsmesstechnik befindet sich im obe-ren Teil der Blasen-säule. Angebracht ist dort ein 2 und 4 MHz Transducer im zentralen Lot zum Kapil-lareinsatz. Durch einen weiteren Microcontroller wird die UDV-Messung mit der PIV-Messung, durch ein TTL-Signal zeitlich synchronisiert. Ermöglicht wird die Synchronisation durch eine zweifache Lichtschranke. Zusätzlich kann mithilfe der Licht-schranken auch die Aufstiegsgeschwindigkeit ein-zelner Gasblasen, die Ablösefrequenz und der Ab-stand zwischen Gasblasen gemessen werden. Wei-terhin ermöglicht eine Hochgeschwindigkeitska-mera die Einordnung der Blasen-schwärme und die Auswertung der Phasengrenze. Die für die UDV-Geschwindigkeitsauswertung benötigte Schallgeschwindigkeit wird periodisch mithilfe eines Laufzeitenverfahren im Blasenturm ermittelt und beträgt im Mittel ca. 1846 m/s (22,5 °C, 1 bar). Die Tab. 3 stellt die Stoffeigenschaften und die strömungsmechanischen Kennwerte des Gemisches/der Strömung dar.

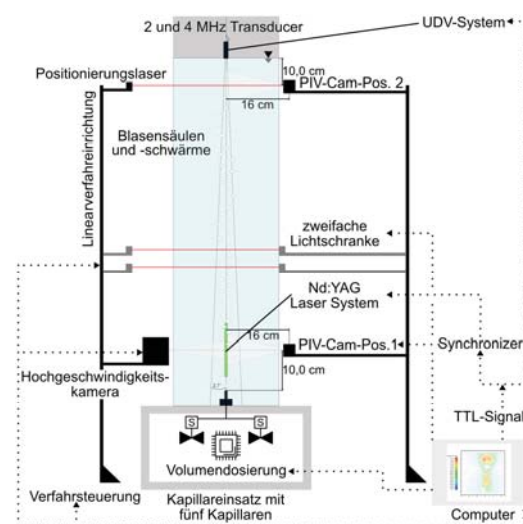


Abb. 5: Schematischer Versuchsaufbau mit akustischer und optischer Messtechnik

Die Vermeidung von Überblendungen und die detaillierte Auflösung der Geschwindigkeitsfel-der an der Phasengrenze wird durch die Zugabe von fluoreszierenden Partikeln ($\rho=1050$ kg/m³, $d_P=1$ μ m) ermöglicht. Die Aufnahme der Strömungspartikel erfolgt anschlie-ßend mit einer Kreuzkorrelations-CCD-Kamera (Aufnahmefeld ca. 65 x 65 mm), bei einer Auf-lösung von 2048 x 2048 Pixeln. Durch einen opti-schen Filter wird nur das Streulicht der fluoreszie-renden Partikel von den Kameras erfasst. Die UDV-Geschwindigkeitsmesstechnik befindet sich im obe-ren Teil der Blasen-säule. Angebracht ist dort ein 2 und 4 MHz Transducer im zentralen Lot zum Kapil-lareinsatz. Durch einen weiteren Microcontroller wird die UDV-Messung mit der PIV-Messung, durch ein TTL-Signal zeitlich synchronisiert. Ermöglicht wird die Synchronisation durch eine zweifache Lichtschranke. Zusätzlich kann mithilfe der Licht-schranken auch die Aufstiegsgeschwindigkeit ein-zelner Gasblasen, die Ablösefrequenz und der Ab-stand zwischen Gasblasen gemessen werden. Wei-terhin ermöglicht eine Hochgeschwindigkeitska-mera die Einordnung der Blasen-schwärme und die Auswertung der Phasengrenze. Die für die UDV-Geschwindigkeitsauswertung benötigte Schallgeschwindigkeit wird periodisch mithilfe eines Laufzeitenverfahren im Blasenturm ermittelt und beträgt im Mittel ca. 1846 m/s (22,5 °C, 1 bar). Die Tab. 3 stellt die Stoffeigenschaften und die strömungsmechanischen Kennwerte des Gemisches/der Strömung dar.

Die Vermeidung von Überblendungen und die detaillierte Auflösung der Geschwindigkeitsfel-der an der Phasengrenze wird durch die Zugabe von fluoreszierenden Partikeln ($\rho=1050$ kg/m³, $d_P=1$ μ m) ermöglicht. Die Aufnahme der Strömungspartikel erfolgt anschlie-ßend mit einer Kreuzkorrelations-CCD-Kamera (Aufnahmefeld ca. 65 x 65 mm), bei einer Auf-lösung von 2048 x 2048 Pixeln. Durch einen opti-schen Filter wird nur das Streulicht der fluoreszie-renden Partikel von den Kameras erfasst. Die UDV-Geschwindigkeitsmesstechnik befindet sich im obe-ren Teil der Blasen-säule. Angebracht ist dort ein 2 und 4 MHz Transducer im zentralen Lot zum Kapil-lareinsatz. Durch einen weiteren Microcontroller wird die UDV-Messung mit der PIV-Messung, durch ein TTL-Signal zeitlich synchronisiert. Ermöglicht wird die Synchronisation durch eine zweifache Lichtschranke. Zusätzlich kann mithilfe der Licht-schranken auch die Aufstiegsgeschwindigkeit ein-zelner Gasblasen, die Ablösefrequenz und der Ab-stand zwischen Gasblasen gemessen werden. Wei-terhin ermöglicht eine Hochgeschwindigkeitska-mera die Einordnung der Blasen-schwärme und die Auswertung der Phasengrenze. Die für die UDV-Geschwindigkeitsauswertung benötigte Schallgeschwindigkeit wird periodisch mithilfe eines Laufzeitenverfahren im Blasenturm ermittelt und beträgt im Mittel ca. 1846 m/s (22,5 °C, 1 bar). Die Tab. 3 stellt die Stoffeigenschaften und die strömungsmechanischen Kennwerte des Gemisches/der Strömung dar.

Tab. 3: Stoffeigenschaften und Kennwerte des 60%igem Glycerin/Wasser-Gemisches und des Gases

Kennwerte:	60% Glycerin/Wasser	Luft	Kennzahlen
	(C ₃ H ₈ O ₃ /H ₂ O)	(78% N ₂ , 21% O ₂)	
Dichte [kg/m ³]	$\rho=1154$	$\rho=1,188$	Prandtl-Zahl [-] Pr=97,13
Dynamische Viskosität [kg/(m·s)]	$\eta=12,4 \cdot 10^{-3}$	$\eta=18,2 \cdot 10^{-6}$	Reynolds-Zahl [-] Re=58,63
Oberflächenspannung [N/m]	$\sigma=65,8 \cdot 10^{-3}$		Morton Zahl [-] Mo=7,05 · 10 ⁻⁷
Gasblasendurchmesser [m]	$d_B=0,003$		Eötvös-Zahl [-] Eo=1,55
Aufstiegsgeschwindigkeit [m/s]	$v_{rel}=0,21$		Weber-Zahl [-] We=2,32

Ergebnisse und Diskussion

Wie in vorherigen Experimenten zum Blasenaufstiegsverhalten, finden alle Messungen im Bereich des stationären Blasenaufstiegs nach der Kapillarablösung statt. Damit werden die Einflüsse der kurzen, instationären Beschleunigungsphase durch die Ablösung ausgeschlossen. Das für die Untersuchung verwendete 60%ige Glycerin/Wasser-Gemisch wirkt sich auf die Blasenoberflächen dämpfend aus. In den vorherigen Untersuchungen war die Blasenform dadurch nahezu unverändert, bei den jetzt untersuchten Blasenschwärmen sind allerdings teilweise starke Formänderungen, durch die Interaktion innerhalb der Gasblasen zu beobachten. Die Ergebnisse der PIV-Aufnahmen im Vergleich zu den Geschwindigkeitsmessungen der UDV-Systeme sind exemplarisch in Abb. 6 (10,0 cm unterhalb der Transducer) dargestellt. Für die Abb. 6 wurde ein gesteuerter Wechsel von einer homogenen Blasensäule zu einzelnen, getakteten Blasenschwärmen eingestellt, um alle Einflüsse in einer Darstellung zu vereinen.

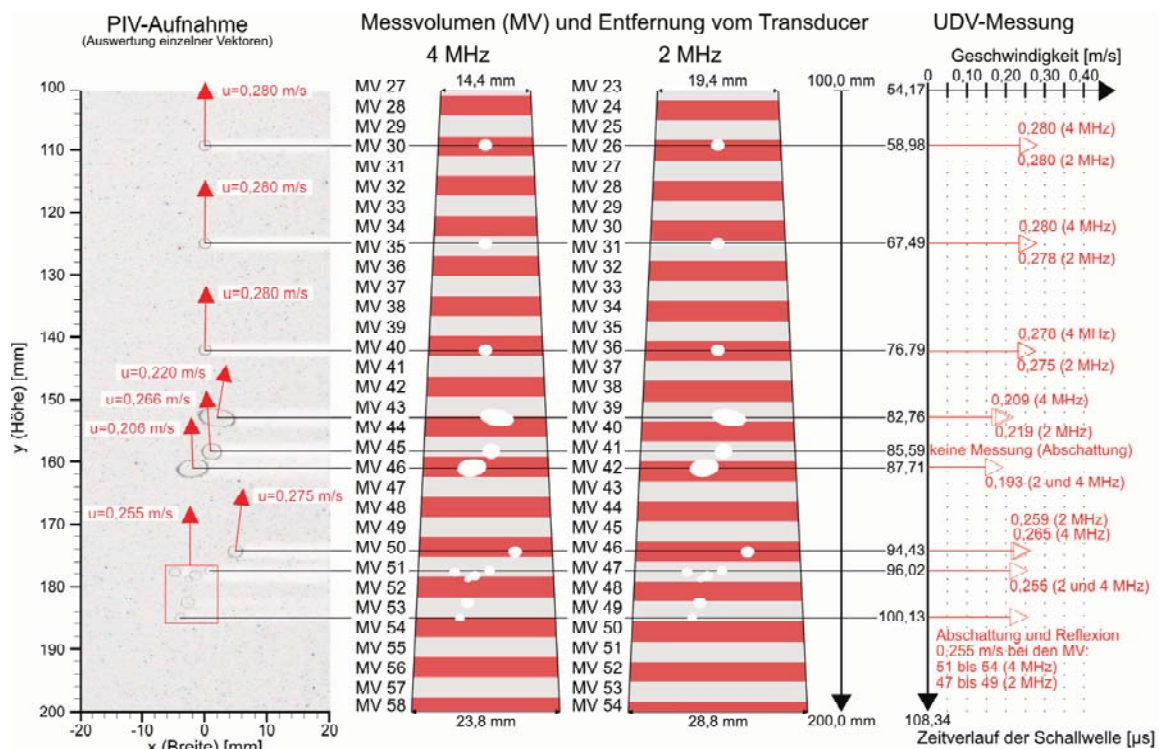


Abb. 6: Vergleich der PIV-Messung (60%iges Glycerin/Wasser-Gemisch, Cam-Pos.2) mit den betroffenen Messvolumen und der Geschwindigkeitsmessung der UDV-Systeme (2 und 4 MHz Transducer)

Ausgehend von den experimentellen Ergebnissen können mehrere Auswirkungen von Einzelblasen, Blasensäulen und Blasenschwärmen auf die UDV-Messtechnik festgehalten werden. Begonnen wird mit der Auswertung des Einflusses von Einzelblasen auf die UDV-Messtechnik. Als Folge der Mittelung des UDV-Systems wird deutlich, dass die detektierten Geschwindigkeiten bei geringen Ablösefrequenzen ($f_{Ab} \leq 3,4 \text{ Hz}$, $\dot{V} \leq 15 \text{ mm}^3/\text{s}$) niedriger ausfallen als die des PIV-Systems. Der Zusammenhang zwischen der gemessenen Aufstiegs geschwindigkeit und dem jeweiligen Messvolumen ist in Abb. 6 dargestellt. Das Ergebnis der Untersuchung ist, dass je weiter die Dopplerverschiebungen auf der Strahlachse in Entfernung zum Transducer gemessen werden, desto größer ist das systembedingte Messvolumen (Divergenz der Schallwelle) und umso geringer ist die detektierte Aufstiegs geschwindigkeit. Aus diesem Grund sollten Messungen mit dem UDV-System im ersten Viertel der maximal messbaren Tiefe stattfinden, damit die quantitativ beste räumliche Auflösung gewährleistet ist.

Ab einer Ablösefrequenz von $f_{Ab} > 3,4 \text{ Hz}$ ($\dot{V} > 15 \text{ mm}^3/\text{s}$), kann von periodisch, stationären und störungsfreien Blasensäulen gesprochen werden. Bei diesen Blasensäulen sind die gemessene

nen Geschwindigkeiten des UDV-Systems allerdings höher, als die des PIV-Systems. Begründet werden kann das durch die Grenze des maximal messbaren Geschwindigkeitsbereiches

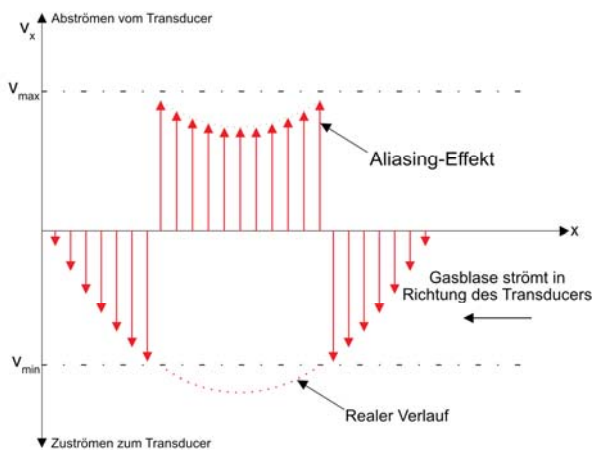


Abb. 7: Aliasing-Effekt mit einer aufsteigenden Gasblase (eigene Darstellung nach Takeda [11])

und dem sich dadurch ergebenden höheren Messfehler. Signifikant wird dieser Fehler im Vergleich mit unterschiedlichen Basisfrequenzen der Transducer. Bei einer Basisfrequenz von 4 MHz ist die maximale Eindringtiefe, für Messungen ab 700 mm erreicht und es ergibt sich ein maximal messbarer Geschwindigkeitsbereich von -152,1 bis 150,9 mm/s. Die Aufstiegsgeschwindigkeiten der Gasblasen innerhalb der Blasensäule sind allerdings von Beginn an höher und damit kommt es zum sogenannten Aliasing-Effekt bzw. einer fehlerhaften Abtastung (Nyquist-Shannon Abtasttheorem). Dieser Effekt tritt auf, wenn der maximale Geschwindigkeitsbereich überschritten

wird und führt zu einer verminderten, im Vorzeichen veränderten Geschwindigkeitsdetektion. Bei den 2 MHz Transducern tritt dieser Effekt ab einer Ablösefrequenz von $f_{Ab} \geq 10$ Hz bzw. $\dot{V} \geq 46$ mm³/s, bei der eingestellten Eindringtiefe (siehe Tab. 2) und Schallgeschwindigkeit auf. Nimmt der Volumenstrom anschließend weiter zu, verstärkt sich der Effekt und die detektierte Geschwindigkeit nimmt weiter ab. Die Abb. 7 verdeutlicht schematisch den entstehenden Effekt. Bei bekannten Strömungsverhältnissen kann dieser Effekt, wie in der Abb. 6 (bei den 4 MHz Transducern) mithilfe der Gl. (8) rechnerisch eliminiert werden.

$$v_{Aliasing} = |v_{min} - (|v_{min}| + v_{res}) - |v_{UDV}|| = |v_{max} - |v_{UDV}|| \quad (8)$$

Bei unbekanntem Strömungsverhältnissen und -geschwindigkeiten kann dieser Einfluss natürlich nicht rechnerisch minimiert werden, denn auch mehrfache Aliasing Effekte sind möglich. Damit die Aufstiegsgeschwindigkeiten wieder ohne Aliasing-Effekt gemessen werden können, müssen die Messparameter angepasst werden. Die Anpassung hat allerdings zur Folge, dass die weiteren Messungen mit einer geringeren Auflösung stattfinden (Geschwindigkeiten in den Messungen steigen), denn das Produkt des Geschwindigkeitsbereiches und der Eindringtiefe ist konstant (siehe Gl. (6)).

Die Untersuchung der Blasenschwärme zeigt, dass die Messung einzelner Aufstiegsgeschwindigkeiten innerhalb eines Schwarmes mit der UDV-Technik nicht möglich ist. Begründen werden kann das durch die Mittelung innerhalb eines Messvolumens. Im Gegensatz zu Einzelblasen zeigen die Messergebnisse eines Blasenschwarms allerdings nun die Geschwindigkeiten des PIV (auch in weiter vom Transducer entfernten Messvolumen). Auch dieses Ergebnis lässt sich auf die Mittelung in den Messvolumen zurückführen, denn nun befinden sich mehrere Gasblasen mit ähnlicher Geschwindigkeit (Blasenschwarm) innerhalb eines UDV-Messvolumens (siehe Abb. 6). Aufgrund der hohen dreidimensionalen Bewegung/Auslenkung der Gasblasen können einzelne Blasenschwärme auch zeitweise aus den Messvolumen der UDV-Messung verschwinden. Dieses Resultat ist vor allem beim Einsatz von mehreren Transducern parallel oder in einem Array zu erkennen. Dort kann sogar die Bahn des Blasenschwarms näherungsweise bestimmt werden. Bei einer gleichzeitigen Erzeugung von Gasblasen aus allen fünf Kapillaren und einem hohen Volumenstrom kann ein Messsignal auch vollständig innerhalb eines Messvolumen reflektiert werden. Die nachfolgenden Messvolumen zeigen dann die Geschwindigkeit dieses Messvolumens an (siehe Abb. 6 unten). Eine Vermeidung dieses Fehlers ist nur durch eine Reduzierung des Gasvolumenstrom zu erreichen.

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchung ist, dass bei einzelnen Messvolumen die Aufstiegs- geschwindigkeiten bis auf null abnehmen und anschließend wieder ansteigen. Die betroffenen Messvolumen lassen sich entsprechend der verwendeten Messparameter und des Abstandes vom Transducer zum Boden variieren. Dieser Fehler lässt sich mit reflektierten, interferierenden Schallsignalen gleicher Intensität erklären.

Weiterhin sollte bereits bei der Installation der Transducer ein dauerhafter Phasenübergang auf der oszillierenden Membran des Transducers durch sich absetzende Gasblasen vermieden werden. Für die Verbesserung von Messungen mit sehr kleinen Strömungsgeschwindigkeiten ($v < 13 \text{ mm/s}$) wird die Erzeugung von Gasblasen mit einer maximalen Größe von $50 \mu\text{m}$ gegenüber akustischen Tracer-Partikeln empfohlen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Einzelblasen, homogene Blasensäulen und Blasenschwärme mithilfe einer Programmlogik erkannt und gefiltert werden können. Die weiteren beschriebenen Effekte lassen sich nur durch eine exakte Bestimmung/Definition der Messparameter/-umgebung (max. Aufstiegs- geschwindigkeit, Eindringtiefe, Schallkegel, etc.) reduzieren bzw. vermeiden.

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] H. Meironke, D. Klembt und T. Panten, Untersuchungen zum Einfluss von Gasblasen auf die Ultraschall Doppler Messtechnik mittels optischer und numerischer Methoden, B. Ruck, C. Gromke, A. Leder und D. Dopheide, Hrsg., Karlsruhe: Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 25. Fachtagung der GALA e.V., 2017, pp. 45/1-45/8.
- [3] D. Klembt, H. Meironke und E. Pommer, Untersuchungen zum Einfluss von Blasensäulen auf die Ultraschall Doppler Messtechnik, S. Grundmann, M. Brede, B. Ruck, A. Leder und D. Dopheide, Hrsg., Rostock: Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 26. Fachtagung der GALA e.V., 2018, pp. 7.1-7.8.
- [4] D. Bhaga und M. E. Weber, Bubbles in Viscous Liquids: Shapes, Wakes, Bd. 105, Cambridge: Journal of Fluid Mechanics, 1981, pp. 61-85.
- [5] P. Grassmann, Physikalische Grundlagen der Chemie-Ingenieur-Technik, Frankfurt am Main: Sauerländer Verlag, 1961.
- [6] R. Clift, J. R. Grace und M. E. Weber, Bubbles, Drops, and Particles, Cambridge: Academic Press, 1978.
- [7] T. Miyahara und S. Yamanaka, Mechanics of Motion and Deformation of a Single Bubble Rising through Quiescent Highly Viscous Newtonian and Non-Newtonian Media, Japan: Journal of Chemical Engineering, 1993.
- [8] J. R. Crabtree und J. Bridgwater, Bubble Coalescence in Viscous Water, Amsterdam: Chemical Engineering Science, 1971.
- [9] T.-O. Paaschen, Detaillierte Untersuchung des Stoffübergangs in Blasenströmungen, Hannover: Dissertation an der Universität Hannover, 1998.
- [10] Y. Takeda, Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow, Tokyo: Springer-Verlag, 2012.
- [11] S. Eckert und S. Franke, Ultraschall-Doppler-Velozimetrie, Dresden: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, 2018.