

Untersuchung des Aufstiegs von Einzelblasen in Newtonschen und nicht-Newtonschen Fluiden mittels PIV

Investigation of the rise of single bubbles in Newtonian and non-Newtonian liquids with PIV

Lutz Böhm, Matthias Kraume

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Verfahrenstechnik, FH6-1, Fraunhoferstrasse 33-36, 10587 Berlin

PIV, Blasen, nicht-Newtonsche Fluide, rechtwinkliger Kanal
PIV, bubbles non-Newtonian liquids, rectangular channel

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wird der Aufstieg von Einzelblasen in rechtwinkligen Kanälen, wobei die Blasengröße im Bereich der Größe des Plattenabstands liegt, untersucht.

Hierfür werden die Parameter Blasengröße, Plattenabstand und überlagerte Flüssigkeitsgeschwindigkeit und Rheologie variiert und das die Blase umgebende Fluid mittels Particle Image Velocimetry (PIV) untersucht. Für die quantitative Auswertung wird mittels einer automatisierten Anlage eine hinreichende Datenbasis erzeugt und statistisch ausgewertet.

Genauer untersucht werden dabei die auftretenden Geschwindigkeitsfelder, Wirbelstärken und Scherraten.

Während beim Aufstieg der Blasen in Wasser diese oszillieren und sich damit einhergehend eine Kármán'sche Wirbelstrasse ausbildet, treten beim Aufstieg in einem strukturviskosen Medium keine Oszillationen auf. Dies ist dadurch zu erklären, dass sich wie für den freien Aufstieg im strukturviskosen Medium auch im rechtwinkligen Kanal eine komplexe, aber symmetrische Strömung ausbildet. Dabei kommt es zu einer ringförmigen Umströmung der Blase und in deren Nachlauf zur Ausbildung eines dreieckigen Bereich mit nach unten gerichteter Strömung und seitlich darauf liegender Aufwärtsströmung.

Einleitung

Frei aufsteigende Einzelblasen sind sowohl experimentell als auch numerisch in der Literatur extensiv untersucht worden. Die Untersuchung der Reinigungsvorgänge von Membranen mittels Belüftung, in diesem Fall speziell von Flachmembranmodulen, motiviert die grundlegende Untersuchung des Aufstiegs von Einzelblasen in rechtwinkligen Kanälen, wobei die Blasengröße im Bereich der Größe des Plattenabstands liegt. Dieser Fall ist in der Literatur in der hier bearbeiteten Form nicht zu finden.

An dieser Stelle sollen nur die Arbeiten von zwei Gruppen hervorgehoben werden, die mit PIV gearbeitet haben. Für den freien Blasenaustieg in einer Newtonschen Flüssigkeit hat Brücker (Brücker 1999) eine ausführliche Untersuchung mittels 2D PIV in verschiedenen Schnittebenen durchgeführt, wobei diese Schnittebenen z.T. auch unterschiedliche Ausrichtungen haben. Er gibt eine ausführliche Erklärung der oszillierenden Bewegung der Blase

beim Aufstieg, die er auf die sich ausbildenden Druckverhältnisse, deren Auswirkungen auf die Form der Blase und den sich damit periodisch an den Seiten ausbildenden „hairpin vortex“ zurückführt.

Bei der Untersuchung des freien Aufstiegs von Blasen in nicht-Newtonschen Flüssigkeiten (hier: strukturviskos, z.T. viskoelastisch) hat sich vor allem die Arbeitsgruppe um Funfschilling und Li hervorgetan (Frank et al. 2003, Funfschilling & Li 2001, Li et al. 2004). Dabei wurde das im Vergleich zum Aufstieg in Wasser veränderte Umströmungsverhalten um die Blase beschrieben. Es zeigte sich dabei ein symmetrisches Strömungsverhalten um die senkrechte Mittelachse der Blase. Dieses symmetrische Strömungsfeld führt somit auch nicht zu Oszillationen der Blase beim Aufstieg wie sie (bei bestimmten Blasengrößen) in Wasser auftreten. Es kommt zu einer kreisförmigen Umströmung der Blase. Im Nachlauf der Blase bildet sich zentral eine kegelförmige, nach unten gerichtete Strömung aus, auf deren Mantelfläche die Flüssigkeit nach oben strömt. Damit einher geht eine deutlich veränderte Blasenform im Vergleich zur Blasenform in Wasser (Funfschilling & Li 2006).

Gemein haben die meisten Untersuchungen des Blasenauftiegs mit Hilfe von PIV, dass die damit gewonnenen Daten oft nur für qualitative Aussagen genutzt werden. Die quantitativen Informationen werden meist aus parallel durchgeführten Shadowgraphy-Messungen gewonnen. Die PIV-Daten unterstützen zwar die Vertiefung des Verständnisses der Vorgänge, jedoch können sie nur schwer zum Vergleich zwischen den Ergebnissen verschiedener Arbeitsgruppen und CFD-Arbeiten genutzt werden. Ein Ziel dieser Arbeit ist es, statistisch basierte quantitative Auswertungen der gewonnenen Daten durchzuführen. Hierfür wird eine automatisierte Anlage realisiert, die für die statistische Auswertung benötigte Datenbasis liefert und anschließend auftretende Geschwindigkeiten, Wirbelstärke und die Scherrate ausgewertet.

Material und Methoden

Für die Untersuchung wird ein rechteckiger Kanal genutzt. Eine genaue Beschreibung der Anlage ist in (Böhm et al. 2013) zu finden. Bei der hier dargestellten Untersuchung wurden jedoch andere Kanäle genutzt, die einen längeren Aufstiegsweg und eine bessere optische Zugänglichkeit ermöglichen (Abb. 1a). Die Abmaße sind 160 mm x 5 oder 7 mm x 1500 mm (BxTxH). Am unteren Ende des Kanals wird mit Hilfe einer Spritzenpumpe eine Blase definierten Durchmessers erzeugt. Die Blase wird zunächst in einem Becher aufgefangen, der dann mittels eines Elektromotors gedreht wird, wodurch die Blase dann aufsteigen kann. Zusätzlich kann eine gleichgerichtete Flüssigkeitsströmung erzeugt werden, was den Bedingungen in einem als Schlaufenreaktor gebauten Membranreaktor entspricht. Die Anlage wird dabei mit Hilfe von NI LabVIEW gesteuert, wodurch eine beliebige Anzahl von Blasen unter gleichbleibenden Bedingungen erzeugt werden kann. Weitere variierte Parameter sind die oben genannte Kanaltiefe, die durch zwei Kanäle mit unterschiedlichen Tiefen eingestellt werden kann, und die Viskosität der Flüssigkeit, wobei zum einen Wasser und zum anderen eine Xanthanlösung, die ein strukturviskoses Verhalten aufweist, verwendet wird. Dadurch ergeben sich ca. 38 getestete Parameterkombinationen, wobei hier nur die quantitativen Ergebnisse für Wasser gezeigt werden.

Für die PIV Messungen wird ein LaVision Flowmaster 2D-PIV System mit einem gepulsten Nd:YAG Laser mit einer maximalen Doppelpulsrate von 15Hz und eine Imager Pro SX 5M CCD Kamera mit 12bit-range verwendet.

Für die Auswertung werden pro Parameterkombination je 30 Blasen erzeugt. Da die Blase ein hochtransientes Verhalten aufweist, ist ein echtes Phase-Locking speziell mit einer hier genutzten stationären Kamera nicht möglich. Dennoch wird annähernd ein Phase-Locking durch die Triggerung der Messung möglich. Sobald die Blase aufsteigt, gibt es ein Trigger-

signal an die PIV, wodurch die Messung gestartet wird. Auch wenn die Blase nicht am gleichen Ort auf dem Bildern zu finden ist, kann man das Bild aus der bei einer Blasenanstieg aufgenommenen Bilderserie heraussuchen, auf dem die Blase annähernd an einem bestimmten Ort vorliegt. Da die Blase sich dennoch nicht exakt am gleichen Ort und auch nicht exakt in der gleichen Phase des periodischen Aufstiegs befindet, ist es trotz pseudo-phase-locking nicht sinnvoll ein gemitteltes Strömungsfeld zu erzeugen. Hier wird die Variante gewählt, sich von den lokalen Informationen zu lösen und unabhängig vom Ort des Auftretens, eine Wahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmter Größen in allen ausgewerteten Strömungsbildern einer Parameterkombination zu errechnen. Dadurch ergibt sich für jede Parameterkombination je eine Wahrscheinlichkeitssummenfunktion für die ausgewerteten Größen Absolutgeschwindigkeit, Wirbelstärke und Scherrate. Aus den Wahrscheinlichkeitssummenfunktionen werden die Bereiche der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von 1 bis 10%, 10 bis 90% und 90 und 99% extrahiert und tabellarisch dargestellt.

Auswertung und Diskussion

Die Abbildungen 1b) und c) zeigen typische Strömungsbilder beim Aufstieg einer Blase in Wasser und in der Xanthanlösung. Trotz der Einschränkung des Aufstiegswegs und der Flüssigkeitsströmung im engen Kanal, kommt es zu Strömungsbildern, die mit denen beim freien Aufstieg vergleichbar sind. Im Gegensatz zum freien Aufstieg sind die Strömungsstrukturen jedoch durch den Wandeinfluss annähernd als zweidimensional anzusehen.

Für den Aufstieg in Wasser (Abb. 1b) erkennt man eine Kármán'sche Wirbelstrasse mit periodisch auftretenden, gegenläufig rotierenden Wirbeln im Nachlauf der Blase, die ein Indikator für die oszillierende Bewegung der Blase ist. Zusätzliche Untersuchungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera zeigen, dass mit der oszillierenden Bewegung eine ausgeprägte Deformation der Blase einhergeht. Das für die Bewegung und Deformation verantwortliche Druckfeld um die Blase wird in (Brücker 1999) diskutiert.

Für den Aufstieg in der Xanthanlösung (Abb.1c) erkennt man das annähernd symmetrische Strömungsfeld. Hier treten folglich – wenn überhaupt – auch nur minimale Oszillationen auf. Bei der hier verwendeten, relativ geringen Xanthankonzentration ist Blasendeformation abgesehen von der ovalen Form der Blase nicht stark ausgeprägt. Auf den Bildern kaum zu erkennen jedoch bei genauer Beobachtung durchaus sichtbar ist die für Blasen in strukturoviskosen Medien typische Spitze zentral auf der Unterseite der Blase, wie sie auch bei (Funfschilling & Li 2006) beschrieben wird. Des Weiteren kommt es auch zur zentralen Abwärtsströmung im Nachlauf der Blase.

In den Tabellen 1 bis 3 sind die Ergebnisse der quantitativen Auswertung der Strömungsverhältnisse beim Aufstieg in Wasser zu finden. In Tabelle 1 sind dabei die Ergebnisse der auftretenden Absolutgeschwindigkeiten für alle untersuchten Parameterkombinationen zusammen getragen. Es ist zu erkennen, dass bei konstantem Plattenabstand und konstanter Blasengröße das allgemeine Niveau der Wahrscheinlichkeitsbereiche mit steigender Flüssigkeitsgeschwindigkeit ebenfalls ansteigt. Beim Anstieg der überlagerten Flüssigkeitsgeschwindigkeit bleibt die Größe des Intervalls zwischen 1% und 99% Auftretswahrscheinlichkeit jedoch je Blasengröße annähernd konstant. Bei konstanter Blasengröße und konstanter Flüssigkeitsgeschwindigkeit nimmt das Niveau und auch die Intervallgröße zwischen 1% und 99% Auftretswahrscheinlichkeit der Absolutgeschwindigkeiten mit zunehmendem Plattenabstand ab. Dies ist durch den größeren, für den Aufstieg zur Verfügung stehenden Querschnitt des Kanals erklärbar.

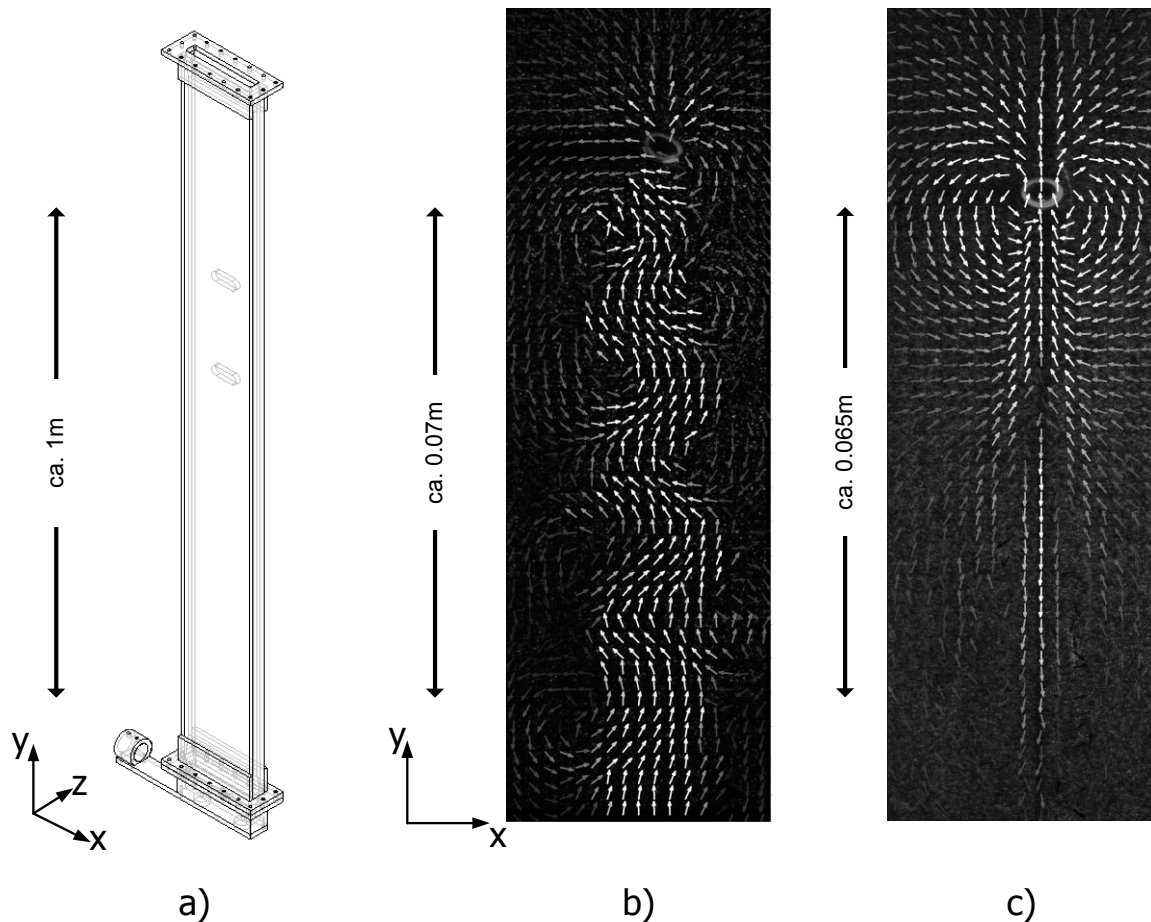


Abb. 1: Schematische Zeichnung des rechteckigen Kanals (a), typisches Strömungsfeld einer 5 mm Blase in einem 5 mm Kanal in der Umgebung der Blase beim Aufstieg in Wasser (b) und in der Xanthanlösung (c)

Tabelle 1: Wahrscheinlichkeitsbereiche der Wahrscheinlichkeitssummenfunktionen der auftretenden Absolutgeschwindigkeiten [in cm/s] in der Nähe der Blase beim Aufstieg in Wasser

Kanaltiefe [mm]		5			7			
		0	10	20	0	10	20	
Blasen- größe [mm]	3	1% – 10%	0–0,1	21,0–23,4	--	0–0,2	14,1–15,7	--
		10% – 90%	0,1–2,3	23,4–26,4	--	0,2–2,8	15,7–17,7	--
		90% – 99%	2,3–5,2	26,4–28,0	--	2,8–5,1	17,7–18,5	--
	5	1% – 10%	0,3–0,8	19,7–22,9	36,6–42,5	0–0,3	12,4–14,8	25,2–28,1
		10% – 90%	0,8–10,5	22,9–29,1	42,5–52,2	0,3–3,1	14,8–17,9	28,1–35,3
		90% – 99%	10,5–21,9	29,1–44,5	52,2–58,2	3,1–8,2	17,9–20,8	35,3–38,1
	7	1% – 10%	0,8–2,2	0,15–21,2	32,8–40,4	0,2–0,8	12,5–15,0	25,3–28,4
		10% – 90%	2,2–25,7	21,2–40,1	40,4–55,5	0,8–9,5	15,0–20,5	28,4–35,9
		90% – 99%	25,7–43,2	40,1–60,1	55,5–77,1	9,5–20,5	20,5–33,8	35,9–46,0
	9	1% – 10%	--	--	--	0,8–1,9	10,1–13,5	23,6–27,2
		10% – 90%	--	--	--	1,9–17,0	13,5–27,5	27,2–38,6
		90% – 99%	--	--	--	17,0–33,3	27,5–45,3	38,6–58,7

Tabelle 2: Wahrscheinlichkeitsbereiche der Wahrscheinlichkeitssummenfunktionen der auftretenden Wirbelstärken [in s^{-1}] in der Nähe der Blase beim Aufstieg in Wasser

Kanaltiefe [mm]		5			7			
Flüssigkeitsgeschwindigkeit [cm/s]		0	10	20	0	10	20	
Blasengröße [mm]	3	1% - 10%	-22,6--5,1	-27,4--11,2	--	-7,3--3,0	-15,2--7,1	--
		10% - 90%	-5,1--3,7	-11,2--9,8	--	-3,0--2,2	-7,1--6,2	--
		90% - 99%	3,7--21,2	9,8--25,5	--	2,2--6,5	6,2--14,3	--
	5	1% - 10%	-64,3--16,0	-54,1--16,1	-59,4--23,1	-23,3--5,1	-26,7--10,4	-34,9--15,7
		10% - 90%	-16,0--11,6	-16,1--11,4	-23,1--18,8	-5,1--4,2	-10,4--8,4	-15,7--14,6
		90% - 99%	11,6--61,7	11,4--51,5	18,8--56,5	4,2--21,8	8,4--23,7	14,6--32,6
	7	1% - 10%	-78,8--21,1	-86,7--26,1	-88,7--28,7	-43,2--9,9	-37,7--10,8	-41,4--17,4
		10% - 90%	-21,1--21,1	-26,1--22,4	28,7--23,1	-9,9--8,2	-10,8--9,3	-17,4--13,7
		90% - 99%	21,1--80,4	22,4--81,3	23,1--83,2	8,2--41,6	9,3--37,2	13,7--37,7
	9	1% - 10%	--	--	--	-57,6--14,8	-56,7--15,6	-57,4--22,4
		10% - 90%	--	--	--	-14,8--12,3	-15,6--14,1	-22,4--17,3
		90% - 99%	--	--	--	12,3--55,2	14,1--53,8	17,3--54,7

Tabelle 3: Wahrscheinlichkeitsbereiche der Wahrscheinlichkeitssummenfunktionen der auftretenden Scherraten dw_y/dx [in s^{-1}] in der Nähe der Blase beim Aufstieg in Wasser

Kanaltiefe [mm]		5			7			
Flüssigkeitsgeschwindigkeit [cm/s]		0	10	20	0	10	20	
Blasengröße [mm]	3	1% - 10%	-11,1--2,6	-16,9--6,8	--	-5,1--1,9	-12,1--5,3	--
		10% - 90%	-2,6--2,5	-6,8--6,4	--	-1,9--1,8	-5,3--5,4	--
		90% - 99%	2,5--10,9	6,4--16,6	--	1,8--5,0	5,4--12,3	--
	5	1% - 10%	-28,4--7,1	-31,6--9,2	-35,1--13,6	-16,3--3,5	-20,1--7,1	-27,2--12,3
		10% - 90%	-7,1--7,0	-9,2--8,9	-13,6--12,8	-3,5--3,4	-7,1--7,3	-12,3--12,5
		90% - 99%	7,0--28,2	8,9--31,1	12,8--35,2	3,4--16,2	7,3--20,8	12,5--27,7
	7	1% - 10%	-45,0--13,6	-48,9--14,4	-53,4--17,1	-28,4--7,4	-28,5--7,5	-33,2--13,2
		10% - 90%	-13,6--15,0	-14,4--14,5	-17,1--15,7	-7,4--7,2	-7,5--7,5	-13,2--12,8
		90% - 99%	15,0--49,1	14,5--48,4	15,7--53,8	7,2--28,3	7,5--28,8	12,8--32,1
	9	1% - 10%	--	--	--	-43,7--10,4	-43,0--10,7	-43,6--15,4
		10% - 90%	--	--	--	-10,4--10,0	-10,7--11,2	-15,4--15,1
		90% - 99%	--	--	--	10,0--43,9	11,2--42,8	15,1--45,1

Bei konstantem Plattenabstand und konstanter Flüssigkeitsgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Blasengröße der Intervall zwischen 1% und 99% Auftretswahrscheinlichkeit der Absolutgeschwindigkeit zu, wobei die Tendenz sichtbar ist, dass die Zunahme für Parameterkombinationen, bei denen die Blasengröße gleich oder größer dem Plattenabstand ist, stärker ausgeprägt ist.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der auftretenden Wirbelstärken für alle untersuchten Parameterkombinationen zusammen getragen. Die Symmetrie der Werte um den Nullpunkt spricht dabei für die Güte der zugrundeliegenden Datenbasis. Bei konstantem Plattenabstand und konstanter Blasengröße deuten sich drei Tendenzen mit steigender Flüssigkeitsgeschwindigkeit an. Für Blasengrößen kleiner als der Plattenabstand führt eine Erhöhung der überlagerten Flüssigkeitsgeschwindigkeit zu einer Vergrößerung der Intervallgröße zwischen 1% und 99% Auftretswahrscheinlichkeit der Wirbelstärke. Für Blasengrößen gleich dem Plattenabstand sind keine eindeutigen Tendenzen zu erkennen. Für Blasengrößen größer als der Plattenabstand sind die Intervallgrößen annähernd konstant. Bei konstanter Blasengröße und konstanter Flüssigkeitsgeschwindigkeit nimmt die Intervallgröße zwischen 1%

und 99% Auftrittswahrscheinlichkeit der auftretenden Absolutgeschwindigkeiten mit zunehmendem Plattenabstand ab. Auch hier gilt, dass dies durch den größeren, für den Aufstieg zur Verfügung stehenden Querschnitt des Kanals erklärbar ist. Bei konstantem Plattenabstand und konstanter Flüssigkeitsgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Blasengröße der Intervall zwischen 1% und 99% Auftrittswahrscheinlichkeit der Wirbelstärken zu.

Die Scherrate dw_y/dx (Tabelle 3) wird hier noch gesondert aufgeführt, da die Scherrate in der Flüssigkeit Einfluss z.B. auf Flockengrößen und Mikroorganismen in Membranbioreaktoren haben kann. Die Tendenzen sind dabei ähnlich wie für die Wirbelstärke aufgezeigt und werden somit nicht gesondert diskutiert.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wird der Aufstieg von Blasen in schmalen rechtwinkligen Kanälen untersucht. In einer Reihenuntersuchung wurden qualitative und quantitative Informationen zur Umströmung der Blase für Parameterkombinationen aus variiertem Kanaltiefe, Blasengröße, Flüssigkeitsgeschwindigkeit und Rheologie mittels PIV ermittelt. Qualitativ zeigte sich ein Verhalten, dass vergleichbar mit dem Verhalten beim freien Aufstieg ist, wie es aus der Literatur bekannt ist. Neben den qualitativen Aussagen wurde für die Darstellung der quantitativen Größen die Wahrscheinlichkeitssummenfunktion für die auftretenden Absolutgeschwindigkeiten, Wirbelstärken und Scherraten gewählt. Diese ermöglicht es, die Parameterkombinationen untereinander aber gegebenenfalls auch mit CFD Daten oder mit den Arbeiten anderer Arbeitsgruppen zu vergleichen. Tendenziell gilt für alle drei ausgewerteten Größen, dass sie mit kleinerer Kanaltiefe, größerer Blase und größerer Flüssigkeitsgeschwindigkeiten ansteigen.

Dankesworte

Wir bedanken uns bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Sonderforschungsbereichs Transregio 63 und des Projekts KR 1639/18-1 und beim Deutschen Akademischen Austauschdienst im Rahmen des Projekts D/10/46059. Während der Arbeit wurde ich unterstützt durch Andrea Hasselmann, Eva Lenhart, Sven Kohtz und Nikolay Kolev.

Literatur

- Böhm, L., Drews, A. & Kraume, M., 2013: "Bubble induced shear stress in flat sheet membrane systems - serial examination of single bubble experiments with the electrodiffusion method", J. Membr. Sci., 437, pp. 131–140
- Brücker, C., 1999: "Structure and dynamics of the wake of bubbles and its relevance for bubble interaction", Phys. Fluids, Vol.11, No.7, pp. 1781–1796
- Frank, X., Li, H. Z., Funfschilling, D., Burdin, F., Ma, Y., 2003: "Bubble motion in non-Newtonian fluids and suspensions", Can. J. Chem. Eng., Vol. 81, No.3-4, pp. 483–490
- Funfschilling, D., Li, H. Z., 2006: "Effects of the injection period on the rise velocity and shape of a bubble in a non-newtonian fluid", Chem. Eng. Res. Des., Vol. 84, No. 10, pp. 875 – 883
- Funfschilling, D., Li, H. Z., 2001: "Flow of non-Newtonian fluids around bubbles: PIV measurements and birefringence visualization", Chem. Eng. Sci., Vol. 56, No.3, 1137 – 1141
- Li, H. Z., Frank, X., Funfschilling, D., Diard, P., 2004: "Bubbles' rising dynamics in polymeric solutions", Phys. Lett. A, Vol. 325, No.1, pp. 43 – 50.