

Charakterisierung der Rohrströmung komplexer Fest-Flüssig-Modellstoffsysteme mittels Stereo PIV

Characterization of the pipe flow of complex solid-liquid model material systems using stereo PIV

Bastian Eysel¹⁾, Jan E. Marquardt²⁾, Mathias J. Krause²⁾, Christopher McHardy¹⁾, Cornelia Rauh¹⁾

1) Fachgebiet Lebensmittelbiotechnologie und -prozesstechnik, Technische Universität Berlin, Berlin

2) Institut für mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

PIV, Fruchtzubereitungen, Mehrphasenströmungen, Brechungsindexanpassung (RIM)

PIV, fruit preparations, multiphase flow, refractive index matching (RIM)

Zusammenfassung

Fruchtzubereitungen werden in der Lebensmittelindustrie in verschiedenen Formen verwendet. So werden sie zum Beispiel als Zutat in Molkereiprodukten wie Joghurt mit Fruchtzusatz genutzt. Die wertgebende Komponente der Fruchtzubereitungen stellen dabei die dispergierten Fruchtstücke dar, welche als weiche Partikel mit viskoelastischem Materialverhalten beschrieben werden können. Die kontinuierliche Phase wird von Fluiden mit komplexen, je nach Rezeptur variierenden, Fließverhalten repräsentiert. Eine Charakterisierung zeigte, dass dieses durch das Herschel-Bulkey-Modell beschrieben werden kann.

Da die Schädigung der Fruchtstücke in industriellen Transportprozessen minimiert werden soll, werden mithilfe von transparenten Modellstoffsystemen PIV-Messungen zur Strömungscharakterisierung durchgeführt. Die Modellstoffsysteme bilden dabei die Materialeigenschaften der Fruchtzubereitungen ab, wobei die Rezepturen der kontinuierlichen Phase auf Carboxymethylcellulose und die der dispergierten Feststoffphase auf κ -Carrageen basieren. Um Lichtbrechungseffekte zu vermeiden, werden die beiden Phasen mit Saccharose im Brechungsindex angepasst.

Zur optischen Strömungsmessung wurden die Suspensionen in einem Versuchsstand über pneumatische Druckbeaufschlagung gefördert. Hierbei wurde zuerst mit einem geraden Rohr mit einem Rohrdurchmesser von 50 mm bei vergleichbaren Bedingungen wie in der Industrie gearbeitet. Die Messungen wurden dabei zunächst im einphasigen Herschel-Bulkey-Modell durchgeführt. In weiteren Versuchen wurde das Fluidsystem durch die Zugabe der weichen, viskoelastischen Partikel ergänzt. Die Rohrgeometrie wurde durch stetige und plötzliche Querschnittsveränderungen erweitert. Experimentell wurde das Verhalten der Fluide samt Partikel in laminaren Strömungsbedingungen untersucht und mit numerischen Simulationen mittels Homogenised Lattice Boltzmann Methode (HLBM) verglichen. Das Ziel war es, möglichst hohe Anteile an Modellpartikeln zu verwenden, um realitätsnahe Suspensionen abzubilden und in weiteren Arbeiten deren Partikel-Partikel Interaktionen numerisch untersuchen zu können.

Einleitung

Fruchtzubereitung sind gekochte Mischungen von geschnittenen oder ganzen Früchten in Kombination mit einer flüssigen Komponente, welche unter anderem aus Fruchtpürees, -säften, Zucker und Hydrokolloiden besteht. Ein entscheidendes Qualitätskriterium ist hierbei der Erhalt der fruchttypischen Form, Abweichungen führen häufig zu mangelnder Akzeptanz [Cariola 2004; Michel 2012; Uhlmann 2013]. Daher wird der Einfluss von Rohrleitungseinbauten auf die Integrität der Fruchtstücke bei Transportprozessen mittels PIV untersucht. Die dispergierten Fruchtstücke der Fruchtzubereitungen sind undurchsichtig und die kontinuierliche Phase weist starke Trübungen auf. Die realen Systeme besitzen zudem Feststoffanteile von bis zu 70 %, daher können PIV-Messungen nicht in den realen Systemen durchgeführt werden. Vulprecht et al. 2017, Vulprecht et al. 2018 sowie Vulprecht et al. 2020 haben ähnliche Fragestellungen für Rührprozesse untersucht, allerdings wurden hierbei newtonsche Fluide niedriger Viskosität und vergleichsweise hoher Dichten verwendet. Die Brechungsindexanpassung erfolgte hierbei an das Acrylglas. Die hier gezeigten Messungen wurden hingegen in Modellstoffsyste men nach dem Ansatz von Eysel et al. 2021 durchgeführt. Hierbei wurden die disperse und die kontinuierliche Phase mittels Saccharose im Brechungsindex aufeinander angepasst. Die Fließeigenschaften wurden dabei über Carboxymethylcellulose (CMC) und Laponite® so eingestellt, dass die flüssige Phase eine Fließgrenze sowie scher verdünnende Eigenschaften besitzt. Die rheologischen Eigenschaften der Fruchtstücke wurden, mittels Hydrokolloidgelen imitiert, wobei ein isotropes Materialverhalten der dispersen Phase vorliegt [Eysel et al., 2021].

Die Messungen erfolgten in einem eigens entworfenen Versuchsstand, der in Abbildung 1 dargestellt ist. Zur Validierung der numerischen Modelle mittels HLBM wurden die Messungen zuerst einphasig in einem geraden Rohr durchgeführt. Hierbei wurden Fluide verschiedener Viskositäten verwendet. Anschließend wurden die Messungen in zweiphasigen Fluiden durchgeführt und in unterschiedlichen Rohrgeometrien fortgesetzt.

Material und Methoden

Versuchsstand: Der in Abbildung 1 gezeigte Versuchsstand besteht aus Tank 1 (1), einem pneumatischen Kugelventil (2) (FESTO, Esslingen am Neckar, Deutschland), einer Einlaufstrecke (3) von 75,11 cm Länge, der Messgeometrie (4), einem Magnetisch-induktiven Durchflussmesser (5) (MID) des Typs Promag H300 (Endress + Hauser, Reinach, Schweiz) und Tank 2 (6).

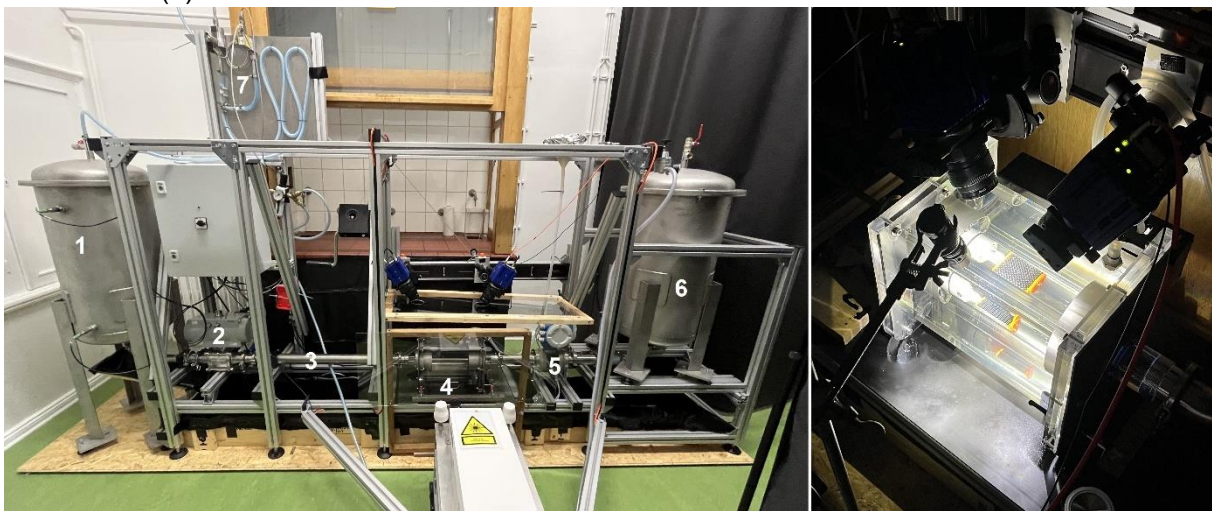


Abbildung 1: Links: Versuchsstand für die Strömungsmessungen, rechts: Box zur Brechungsindexanpassung während der Kalibrierung samt gerader Rohrgeometrie.

Die zwei Tanks besitzen ein Gesamtvolumen von jeweils 100 l. Sie sind mit zwei Grenzstandsensoren bestückt, welche eine Überfüllung und ein Lufteintrag in die Rohrleitung verhindern. Hierzu sind die Grenzstandsensoren über eine Relaischaltung an das Kugelventil gekoppelt. Das Kugelventil dient dabei lediglich dem Öffnen und Schließen der Rohrleitung und nicht als Stellventil. Der Volumenstrom wird über eine Druckluftbeaufschlagung von Tank 1 mittels PID-Regler geregelt. Hierzu wurde ein EL-PRESS Druckmess- und Regelventil (7) (Bronkhorst High-Tech B.V., Ruurlo, Niederlande) in einer Kaskadenschaltung in LabVIEW (National Instruments, Austin, Vereinigte Staaten) eingebunden. Die Laseroptischen Messungen wurden mit einem 2D3C-PIV-System mit zwei Imager sCMOS CLHS Kameras (LaVision GmbH, Göttingen, Deutschland) und einem Nano L 50-100 Nd:YAG-Laser (Litron Lasers, Rugby, England) durchgeführt. Die Kalibrierung wurde „in-Vitro“ mit einer 58-5 und einer 25-3.3 Kalibrierscheibe (LaVision GmbH, Göttingen, Deutschland) durchgeführt.

Rohrgeometrien: Es wurden insgesamt drei Rohrgeometrien genutzt. Zur Validierung der Materialmodelle wurde zuerst ein gerades Rohr mit einem Durchmesser von 50 mm untersucht. Anschließend wurden eine plötzliche und eine stetige Querschnittsänderung von 50 mm auf 25 mm untersucht. Skizzen der Rohrgeometrien sind in Abbildung 2 dargestellt.

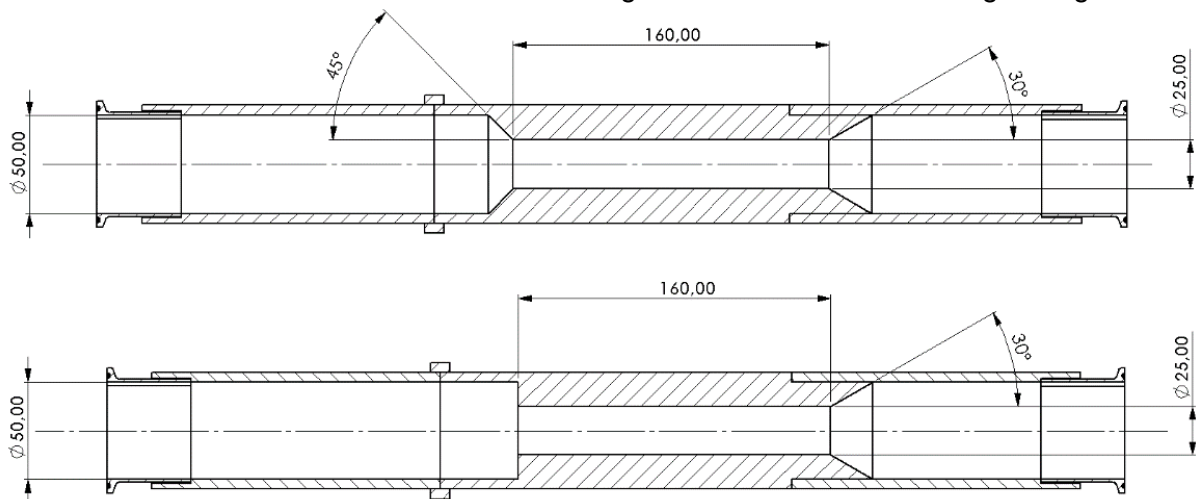


Abbildung 2: Oben: Rohrgeometrie mit stetiger Querschnittsverengung, unten: Rohrgeometrie mit plötzlicher Querschnittsverengung.

Fluide: Es wurden insgesamt vier verschiedene Fluide angesetzt. Hierbei wurden verschiedene Fluideigenschaften eingestellt, wofür zunächst eine CMC-Lösung in einem Homogenisator angesetzt wurde, welche in einem Verhältnis von $\frac{3}{2}$ mit einer Laponite Lösung verschnitten wurden. Die Rezepturen wiesen Konzentrationen von $w_{CMC} = 1,386 \%$, $w_{LAP} = 0,616 \%$, $w_{Saccharose} = 23 \%$ für Fluid A und $w_{CMC} = 0,924 \%$, $w_{LAP} = 0,616 \%$, $w_{Saccharose} = 23 \%$ für Fluid B auf. Bei Ansatz von Fluid C muss ein Wäge Fehler beim Ansetzen der CMC-Lösung erfolgt sein, wodurch die genaue Rezeptur nicht mehr nachvollziehbar ist, es sollte die Rezeptur A angesetzt werden. Aus diesem Ansatz wurde eine einphasige Lösung und eine zweiphasige Lösung mit 25 % Gelpartikeln angesetzt. Fluid B wurde nach den einphasigen Messungen mit 30 % Gelpartikeln versetzt. Die Rezeptur der Hydrokolloidpartikel setzt sich aus $w_{NaCl} = 1,169 \%$, $w_{\kappa-Carrageen} = 0,9439 \%$ und $w_{Saccharose} = 20,5 \%$ zusammen. Für die Strömungsvisualisierung wurden den Fluid-Phasen jeweils fluoreszierende PMMA-RhB-FRAK, 20 – 50 μm Tracerpartikel (microParticles GmbH, Berlin, Deutschland) mit einer Konzentration von $C_{Tracer} = 0,076 \text{ g/l}$ zugegeben. Die Fluide wurden zur Reifung anschließend für sieben Tage ruhen gelassen und parallel zu den PIV-Messungen in einem MCR 102 Rheometer (Anton

Paar, Graz, Österreich) mit einer CP 50-1 Platte-Platte Geometrie in Amplitudentests und Fließkurven charakterisiert. Aus den Messergebnissen wurden Herschel/Bulkley-Modelle erstellt. Zur Erstellung der Herschel/Bulkley-Materialmodelle wurden die Rücklaufkurven der Fließkurven verwendet, wobei in Anlehnung an DIN-Fachbericht 143 als praxisrelevante Einsatzschubspannung die Grenze des viskoelastischen Bereichs gewählt wurde [DIN-Fachbericht 143, 2005]. Dies ist dadurch begründet, dass die Fluide in den rheologischen Charakterisierungen Hysteresekurven zeigten und Laponite-Lösungen thixotrope Eigenschaften aufweisen [Willenbacher, 1996]. Da zur Regelung vor den Messungen zuerst Sprungantworten aufgenommen werden mussten, konnte nicht angenommen werden, dass sie die Fluideigenschaften aus dem Ruhezustand aufweisen. Bei den numerischen Simulationen wurde verglichen, ob Toleranzen von 1 % oder von 10 % bei der Berechnung der Grenze des viskoelastischen Bereichs gewählt werden sollten. In Abbildung 3 sind die gemessenen Rücklaufkurven im Vergleich zu den untersuchten Fruchtzubereitungen gezeigt.

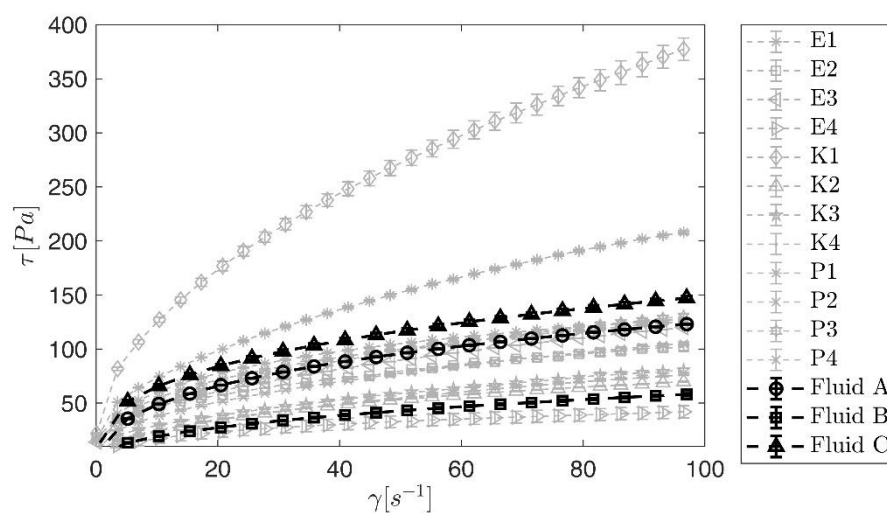


Abbildung 3: Messergebnisse der rheologischen Messungen der einphasigen Fluide. Darstellung der gemessenen Schubspannung (τ) über der Scherrate ($\dot{\gamma}$).

Tabelle 1: Materialverhalten, dargestellt nach dem Fließkurvenmodell von Herschel/Bulkley. τ_0 [Pa] beschreibt die Fließgrenze nach Herschel/Bulkley, welche als Grenze des linear viskoelastischen Bereichs mit einer Abweichung von 1 % und 10 % zum Plateauwert im Amplitudentest ermittelt wurde. Die Fließgrenze wurde im Amplitudentest bestimmt. Der Parameter k [Pa sⁿ] beschreibt den Fließkoeffizienten, n [–] den Fließindex und *RMSE* beschreibt den mittleren quadratischen Fehler des Fits [Herschel und Bulkley, 1926].

Probe	1 % Toleranz				10 % Toleranz			
	τ_0	k	n	<i>RMSE</i>	τ_0	k	n	<i>RMSE</i>
Fluid A	0,63	10,46	0,43	0,85	22,47	3,09	0,62	4,16
Fluid B	0,35	7,01	0,46	0,58	8,28	4,13	0,54	1,71
Fluid C	14,25	20,63	0,41	2,02	46,17	8,03	0,55	6,44

Ergebnisse und Diskussion

Einphasige Messungen in gerader Rohrgeometrie: Aus den PIV-Messungen wurden Strömungsprofile ermittelt und mit den numerischen Lösungen der HLBM-Methoden verglichen. Die ermittelten Strömungsprofile für Fluid A sowie die numerischen Ergebnisse sind in Abbildung 4 gezeigt. In Abbildung 5 sind die Ergebnisse für Fluid B zu sehen. Es ist zu erkennen, dass bei Fluid A die Simulationen aus den Materialmodellen mit einer Toleranz von 10 % besser mit den Strömungsmessungen übereinstimmen.

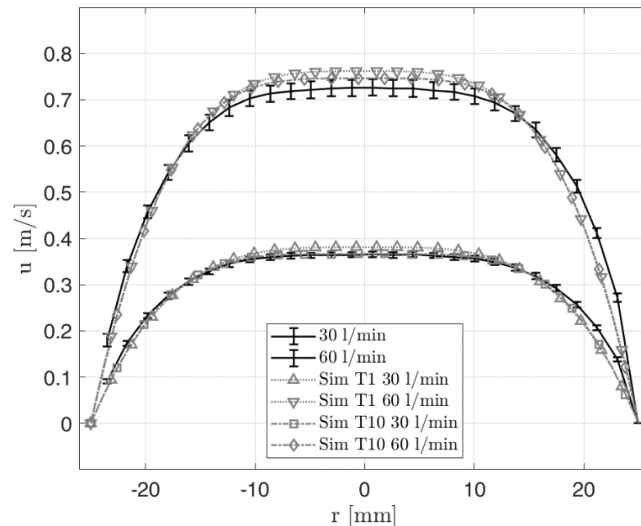


Abbildung 4: Zeitlich gemittelte Strömungsprofile einphasiger Strömungsmessungen mit Fluid A im Vergleich zu den Ergebnissen aus HLBM-Simulationen mit zwei verschiedenen Materialmodellen, gemäß Tabelle 1 (T1=1 % T10 = 10 %).

Dieser Effekt konnte bei Fluid B nicht bestätigt werden. Hier wurden die Messungen bei niedrigeren Fließgrenzen besser abgebildet. Fluid A hat insgesamt eine höhere effektive Viskosität und höhere Fließgrenzen als Fluid B. In den Versuchen hat sich ebenfalls gezeigt, dass der Volumenstrom in dünnflüssigeren Medien besser regelbar ist als in den dickflüssigen Medien. Hierdurch können die niedrigeren Standardabweichungen der Messungen bei Fluid B begründet werden.

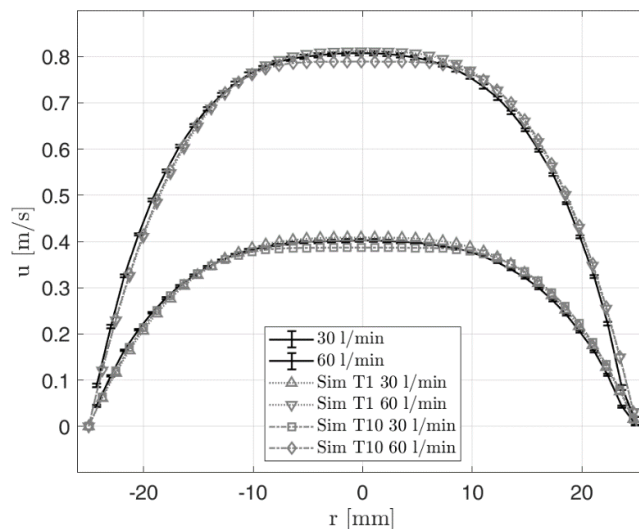


Abbildung 5: Zeitlich gemittelte Strömungsprofile einphasiger Strömungsmessungen mit Fluid B im Vergleich zu den Ergebnissen aus HLBM-Simulationen mit zwei verschiedenen Materialmodellen, gemäß Tabelle 1 (T1=1 % T10 = 10 %).

Der Effekt der schlechteren Regelbarkeit war besonders bei Fluid C zu beobachten, was an den großen Standardabweichungen in Abbildung 6 zu sehen ist. Hierbei kam ebenfalls hinzu, dass eingeschlossene Luftblasen während des Prozesses der Reifung nicht mehr aufsteigen konnten. Die Anwesenheit von Luftblasen beeinträchtigt ebenfalls die Berechnungen der PIV-Messungen. Die Einstellung des Volumenstroms konnte bei Fluid C nur über eine Druckrampe und nicht durch eine Regelung erfolgen. Der Abbildung kann entnommen werden, dass auch hier die höheren Toleranzen zu einer besseren numerischen Lösung geführt

haben, insgesamt jedoch stärkere Abweichungen zwischen Simulation und Experiment vorliegen, welche mit höheren Volumenströmen zunehmen. Bei der Handhabung von Fluid C zeigten sich neben der Regelbarkeit ebenfalls Nachteile der hohen Viskositäten und der hohen Einsatzschubspannungen. Durch die Herstellung, Befüllung sowie Entleerung der Versuchsanlage bestehen Arbeitsschritte, bei denen es zu einem Lufteintrag in die Messlösung kommen kann. Die eingetragenen Luftblasen konnten bei Fluid C nicht mehr entweichen. Bei der Vermengung der Modellfluide mit den Gelpartikeln kann ein Luftblaseneintrag nicht ausgeschlossen werden. Daher sollten bei mehrphasigen Fluiden niedrigere Viskositäten gewählt und die Gelpartikel sollten vor dem Reifungsprozess hinzugegeben werden, da anfangs die Fließgrenze noch nicht ausgebildet ist [Labanda und Llorens, 2008].

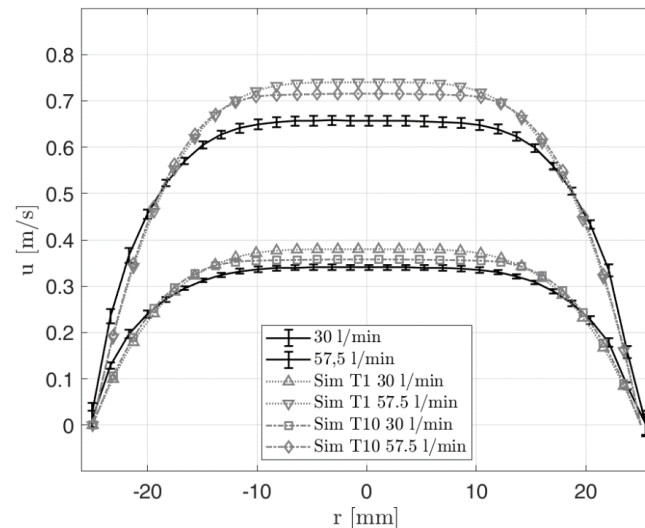


Abbildung 6: Zeitlich gemittelte Strömungsprofile einphasiger Strömungsmessungen mit Fluid A im Vergleich zu den Ergebnissen aus HLBM-Simulationen mit zwei verschiedenen Materialmodellen, gemäß Tabelle 1 (T1=1 % T10 = 10 %).

Zweiphasige Messungen in gerader Rohrgeometrie:

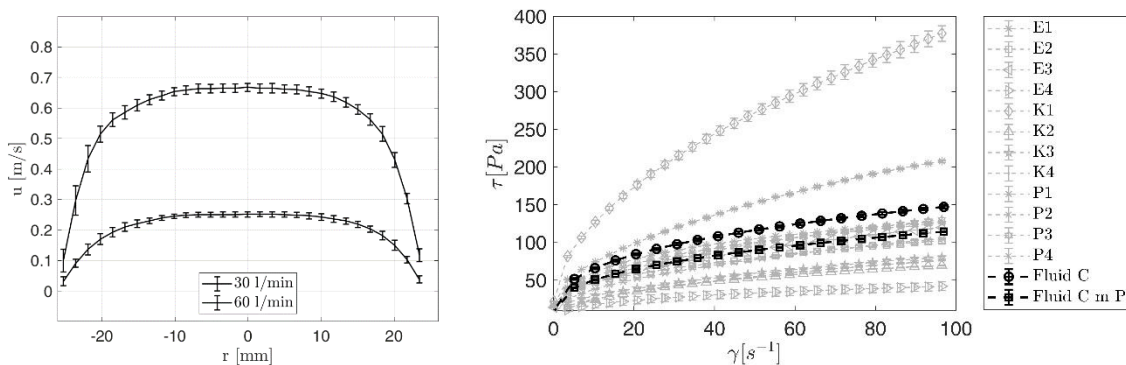


Abbildung 7: Zeitlich gemittelte Strömungsprofile zweiphasiger Strömungsmessungen mit Fluid C und zugehörige Fließkurven mit und ohne Partikel.

Die zweiphasigen Messlösungen erwiesen sich als geeignet, um PIV-Messungen durchzuführen. Die Partikel konnten mit einer automatisch generierten Maske in der Software Davis (LaVision GmbH, Göttingen, Deutschland) maskiert werden. Es zeigte sich, dass die Partikel vermehrt im Randbereich ($r = 10 - 20 \text{ mm}$) aufgetreten sind. In diesem Bereich ist eine Verzögerung der Strömung wahrzunehmen, was sich in Abbildung 7 in den gezeigten Strömungsprofilen durch die größere Standardabweichung zeigt. Die in Abbildung 7 gezeigten Fließkurven zeigen, dass allerdings auch eine Interaktion zwischen den Fluiden und den Gelpartikeln stattgefunden hat. So senken die Gelpartikel die Fließgrenze sowie die Viskosi-

tät der Fluide und die Trübung der Fluide erhöht sich. Dies kann durch den Einfluss der Ionenstärke auf die Eigenschaften von Laponite-Lösungen begründet werden [Labanda und Llorens, 2008]. Ebenfalls werden Speicher- und Verlustmodul der Gelpartikel gesenkt. Die Ursache hierfür wird im osmotischen Gefälle zwischen Gelpartikeln und Fluid vermutet. Erste Untersuchungen zeigen, dass diesen Effekten durch die Anpassung des Salzgehalts in den Flüssigkeiten entgegengewirkt werden kann. Wobei die Trübung der Messlösung 35 NTU für PIV-Messungen nicht überschreiten sollte [Rouzes et al., 2014].

Zweiphasige Messungen mit Querschnittsverengungen:

Die Messungen in den Geometrien mit Querschnittsverengungen wurden mit Fluid B bei einem Partikelgehalt von 30 % durchgeführt. Es wurden vergleichbare Fluidgeschwindigkeiten wie in der geraden Rohrgeometrie angestrebt. Daher wurden die Volumenströme auf 15 und 7,5 l/min eingestellt. Die Kalibrierung wurde unmittelbar hinter der Verjüngung durchgeführt. Die Auswertung entlang einer Linie erfolgte anschließend bei der Position von 0 mm in axialer Richtung (siehe Abbildung 9).

Die Strömungsprofile der beiden Messungen sind in Abbildung 8 gezeigt. Bei der plötzlichen Querschnittsverengung ist zu erkennen, dass die gemittelten Geschwindigkeiten niedrigere Standardabweichungen aufweisen, obwohl beim gemessenen Volumenstrom mit dem MID höhere Standardabweichungen gemessen wurden. Weiterhin ist die Pfropfenströmung bei der plötzlichen Querschnittsverengung deutlicher ausgeprägt als bei der stetigen Querschnittsverengung.

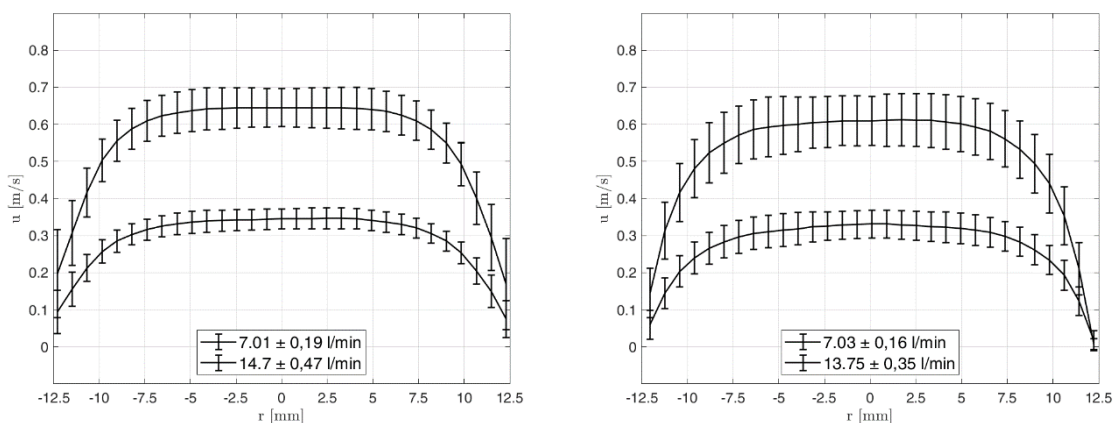


Abbildung 8: Zeitlich gemittelte Strömungsprofile zweiphasiger Strömungsmessungen mit Fluid B in verschiedenen Rohrgeometrien mit Querschnittsverengung. Links: plötzliche Querschnittsverengung, rechts: stetige Querschnittsverengung.

Bei den Messungen zeigte sich, dass bei der plötzlichen Querschnittsverengung die Partikel an der Rohrwand über den Bildbereich hinaus anlagerten. In Abbildung 9 sind hierzu die gemittelten Geschwindigkeitsfelder gezeigt. Es ist zu sehen, dass vor der plötzlichen Querschnittsverengung über die gesamte Aufnahme maskierte Bereiche am Rand vorliegen. So wurde der effektive Rohrquerschnitt hier verringert und es wurden weniger Partikel-Partikel-Kollisionen beobachtet als bei der stetigen Querschnittsverengung. Es konnte ebenfalls beobachtet werden, dass bei der stetigen Querschnittsverengung die Partikel von den Seiten aus in die Mitte geleitet werden, wo es zu Kollisionen zwischen den schnelleren Partikeln im Zentrum der Strömung kommt. Da bei den hier gemessenen Geschwindigkeiten mit dem vorhandenen Aufbau keine zeitlich aufgelösten Messungen möglich sind, konnten die Partikel-Kollisionen bisher nicht quantifiziert werden, jedoch bestätigen höhere Scherraten diese Beobachtung. Die Partikelschädigungen konnten ebenfalls nicht quantifiziert werden, da die Modellpartikel bei einer Nasssiebung ausgewaschen werden.

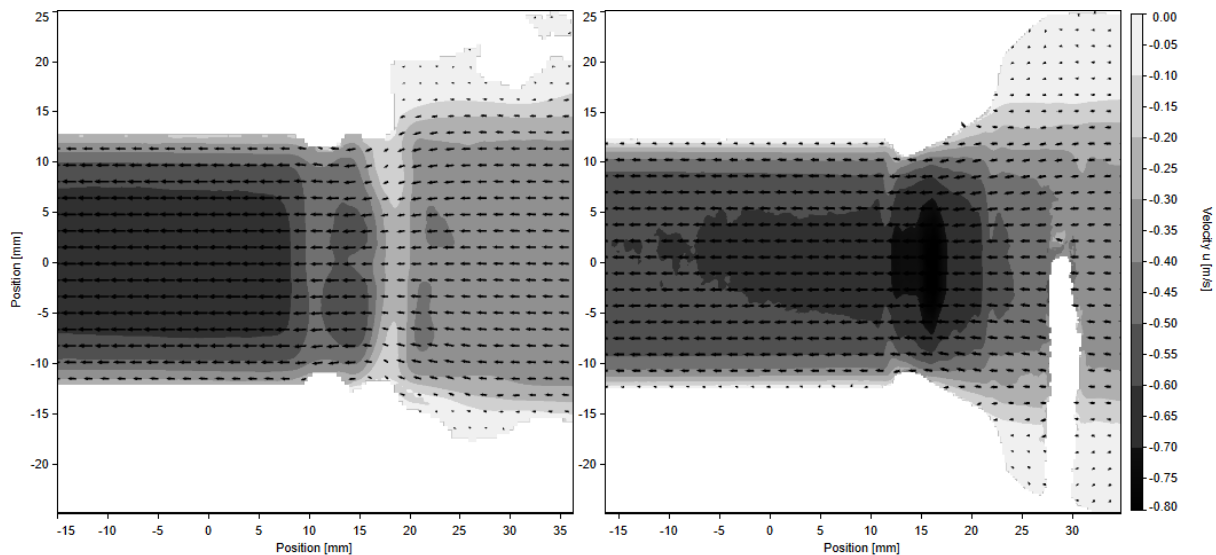


Abbildung 9: Geschwindigkeitsfelder zweiphasiger Strömungsmessungen mit Fluid B in verschiedenen Rohrgeometrien mit Querschnittsverengung. Links: plötzliche Querschnittsverengung, rechts: stetige Querschnittsverengung.

Fazit und Ausblick

Anhand der hier gezeigten Messungen ist zu sehen, dass PIV-Messungen mit den hergestellten Modellfluiden möglich sind. Die komplexen scherverdünnenden Fließeigenschaften erschweren jedoch die Regelung vor allem bei zunehmenden Viskositäten. Zudem beeinflussen Lufteinschlüsse die Messung zusätzlich. Die durchgeführten Simulationen bilden die Messungen ab, wobei die Erholung der Fließgrenze aktuell noch untersucht wird.

Aktuelle Arbeiten befassen sich mit der Quantifizierung der Partikelgrößen über Bildauswertungen von Aufnahmen der Proben in beleuchteten Petrischalen. Weiterhin sollen über die Auswertung der Bildmasken bestimmt werden, an welchen Positionen die Gelpartikel vorliegen und daraus Häufigkeitsverteilungen erstellt werden. Diese sollen der Validierung der HLBM-Simulationen dienen, welche derzeit durchgeführt werden. Aus den HLBM-Simulationen können die Partikel-Partikel-Kollisionen quantifiziert und die dabei wirkenden Kräfte bestimmt werden, welche anschließend für mechanische Simulationen mit finiten Elementen Methoden genutzt werden können. Zusätzlich sollen weitere Messungen mit angepassten Modellstoffsystemen durchgeführt werden, bei denen die Interaktion beider Phasen auf das Minimum reduziert werden.

Dankesworte

Die Autoren danken der Förderung der hier gezeigten Arbeiten im Rahmen des IGF-Vorhabens AiF 21096 N der Forschungsvereinigung Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI). Dieses wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- Cariola, S., 2004:** Mit der Lupe auf der Suche nach Fruchtstücken, Saldo, no. 08, 2004.
- DIN-Fachbericht 143, 2005:** Moderne rheologische Prüfverfahren, 143:2005-04, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- Eysel, B., 2021:** "Herstellung von Brechungsindexangepassten Zwei-Phasen-Modellstoffsystemen zur Imitation von Fruchtzubereitungen für optische Strömungsmessungen" in Experimentelle Strömungsmechanik: 28. Fachtagung: 7.-9. September 2021, Bremen, 2021, 48.1 - 48.8.
- Herschel, W. H. und Bulkley, R., 1926:** Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen, Kolloid-Zeitschrift, vol. 39, no. 4, pp. 291–300, 1926, doi: 10.1007/BF01432034.
- Labanda, J. und Llorens, J., 2008:** "Effect of aging time on the rheology of Laponite dispersions," Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 329, 1-2, pp. 1–6, 2008, doi: 10.1016/j.colsurfa.2008.06.035.
- Uhlmann, B., 2013:** Großes Geschäft mit Kleinstlebewesen, Süddeutsche Zeitung, 05 Feb., 2013. <https://www.sueddeutsche.de/gesundheit/tipps-fuer-den-einkauf-von-joghurt-grosses-geschaeft-mit-kleinstlebewesen-1.1589340-3>
- Michel, C., 2012:** Wo sind die Früchte im Aprikosenjoghurt?, SRF, 2012.
- Rouzes, M., Moulin, F. und Eiff, O., 2014:** Stereoscopic PIV Measurements In Turbid Waters On Natural Beds, 3rd IAHR Europe Congress, Book of Proceedings, 2014, Porto - Portugal. ISBN 978-989-96479-2-3
- Willenbacher, N., 1996:** "Unusual Thixotropic Properties of Aqueous Dispersions of Laponite RD," Journal of colloid and interface science, vol. 182, no. 2, pp. 501–510, 1996, doi: 10.1006/jcis.1996.0494
- Vulprecht, L., Wölken, T., Rauh, C., 2017:** Numerische und experimentelle Untersuchung mechanischer Belastungen bei der Verarbeitung stückiger Fruchtzubereitungen, in Experimentelle Strömungsmechanik: 25. Fachtagung: 5.-7. September 2017, Karlsruhe, 2017, 40.1 - 40.8.
- Vulprecht, L., Wölken, T., Rauh, C., 2018:** "Lokalisierung unerwünschter mechanischer Effekte auf Fruchtpartikel bei der Verarbeitung stückiger Fruchtzubereitungen in Experiment und Simulation" in Experimentelle Strömungsmechanik: 26. Fachtagung: 4.-6. September 2018, Rostock, 2018, 44.1 - 44.8.
- Vulprecht, L., Gerstenberg, C., Rauh, C., 2020:** "Refractive index matching (RIM) of liquid and semi-solid materials to acrylic glass for optically measuring the mechanics in soft granular matter", Granular Matter, vol. 22, no. 2, 2020, doi: 10.1007/s10035-020-01016-y.