

Lokalisierung unerwünschter mechanischer Effekte auf Fruchtpartikel bei der Verarbeitung stückiger Fruchtzubereitungen in Experiment und Simulation

Locating the occurrence of detrimental mechanical effects on fruit particles in the processing of chunky fruit preparations through experiment and simulation

Lennart Vulprecht, Thies Wölken, Cornelia Rauh

Fachgebiet Lebensmittelbiotechnologie und -prozessechnik, Technische Universität Berlin,
Königin Luise Straße 22, 14195 Berlin

Rühren, Fruchtzubereitungen, CFD, PIV, Brechungsindexanpassung (RIM)
Stirring, fruit preparations, CFD, PIV, refractive index matching (RIM)

Zusammenfassung

Stückige Fruchtzubereitungen sind ein komplexes Stoffsystem, sie stellen ein Beispiel einer Suspension von mechanisch hochempfindlichen Feststoffpartikeln makroskopischer Abmessungen dar. Weil Rührprozesse notwendig sind, um die Sicherheit und Qualität solcher Produkte zu gewährleisten, sind diese Partikel normalerweise starken mechanischen Belastungsfeldern sowie Kollisionen mit dem harten Material des Apparates oder miteinander ausgesetzt. Genaue Kenntnis der Fluidmechanik ebenso wie der anderen mechanischen Wechselwirkungen innerhalb dieser gerührten Systeme ist von hohem Interesse in der Lebensmittel- und anderen Technologien, in denen ähnliche Suspensionen verarbeitet werden. Allerdings sind solche hochkonzentrierten dispersen Systeme noch nicht ausgiebig erforscht worden, da sie starke Einschränkungen sowohl für invasive als auch für nicht-invasive Messverfahren aufweisen.

Informationen über mechanische Phänomene in gerührten Suspensionen können zum Beispiel mit optischen Messtechniken gewonnen werden, etwa Particle Tracking Velocimetry (PTV) und Particle Image Velocimetry (PIV). Die Anwendung dieser Techniken ist allerdings durch mehrere Faktoren begrenzt. Daher wurde ein Modellsystem entwickelt, um die Vorgänge innerhalb einer gerührten Suspension von Fruchtpartikeln nachzustellen und fluidmechanische Simulationsmodelle zu validieren. Um solche komplexe Strömungen zu simulieren, wird ein gekoppelter CFD-DEM Ansatz verwendet, in dem zusätzlich zur Euler-Euler-Simulation der Zweiphasenströmung Wechselwirkungen des Fluids mit den Partikeln sowie Partikel-Partikel- und Partikel-Geometrie-Kollisionen berücksichtigt werden.

Geschwindigkeitsverteilungen, die experimentell gemessen wurden, stimmen gut mit simulierten Strömungsfeldern überein. Die Hauptregion, in der zerstörerische Effekte auftreten, scheint die Umgebung des Rührwerkzeugs selbst zu sein, welche gleichzeitig mit den gewählten Methoden am schwierigsten zu beobachten ist. Dies betrifft sowohl die Verteilung von Scher- und Dehnraten als auch die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen der Partikel miteinander. Durch eine erfolgreiche Brechungsindexanpassung sowohl des Rührers als auch der Partikel wurde das System optisch so zugänglich wie möglich gemacht. In zweiphasigen Rührversuchen zeichnet sich ab, dass der Einfluss einer hohen Rührerdrehzahl auf die Geschwindigkeits- sowie Scher- und Dehnratenverteilung bei geringen Partikelanteilen kaum festzustellen ist, bei hohen Partikelanteilen allerdings sehr deutlich wird.

1 Einleitung

Die hier vorgestellte Forschung zielt auf die Optimierung von Rührprozessen hinsichtlich mechanischer Belastungen in der Herstellung von stückigen Fruchtzubereitungen. Simulationsmodelle werden entwickelt, um künstliche neuronale Netze zu erstellen, die in der Lage sind, in spezifischen Rührprozessen abhängig von Produkt- und Prozessanforderungen optimale Prozessparameter vorherzusagen. Geschwindigkeits- und Belastungsverteilungen werden in strömungsmechanischen Experimenten gewonnen, um diese numerischen Modelle zu validieren. Die Strategie ist somit neuro-numerisch und basiert auf Particle Image bzw. Tracking Velocimetry (PIV/PTV), Computational Fluid Dynamics (CFD) und maschinellem Lernen. Stückige Fruchtzubereitungen sind sehr komplexe Systeme, die am besten, wenn überhaupt, mithilfe hybrider Methoden beschrieben werden können, in welchen die Möglichkeiten konventioneller CFD erweitert werden (Díez Robles, 2009). Partikelbeladene, turbulente Strömungen sind wegen ihrer Bedeutung in vielen prozesstechnischen Disziplinen bereits umfassend untersucht worden (Zima-Kulisiewicz, 2008). Eine gute Einführung in die grundlegende und fortgeschrittene Theorie der Rührströmungen bietet das Kapitel *Mixing in Food Process Engineering and Technology* (Berk, 2013), die notwendigen Grundlagen für optische Messmethoden (PIV and PTV) sind in dem sehr umfassenden *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide* (Raffel, et al., 2007) zusammengefasst.

2 Experimente

2.1 Brechungsindexanpassung (Refractive Index Matching, RIM)

Unterschiede in der Lichtbrechung stellen bei der optischen Strömungsmessung eine besondere Herausforderung dar, speziell wenn es um Strömungssituationen mit zwei oder mehr Phasen geht und sich viele bewegliche Grenzflächen im beobachteten Volumen befinden. Brechungsindexanpassung ist für sehr unterschiedliche Versuchsaufbauten dokumentiert worden (Bai, et al., 2014; Budwig, 1994; Byron, et al., 2013; Cui, et al., 1994; Daviero, et al., 2001; Franklin, et al., 2002). Dabei werden flüssige und feste Materialien der Komponenten, die an dem Experiment beteiligt sind, so ausgewählt, dass sie das Licht gleich oder mit Abweichungen innerhalb akzeptierter Toleranzen brechen. Das Problem dabei ist, dass die meisten transparenten Feststoffe Brechungsindizes von 1,5 und höher haben, während die Indizes der meisten verfügbaren Flüssigkeiten sehr viel niedriger sind, zum Beispiel Wasser: 1,33 (Polyanskiy, 2017).

2.2 Material

Transparentes PMMA (Plexiglas) mit einem besonders niedrigen Brechungsindex von 1,49 wird als Material zur Herstellung des Rührapparats ausgewählt. Der Rührer hat eine modifizierte Anker-Form und wird in einem Gefäß mit Klöpperboden betrieben wie in Abb. 1 dargestellt. Der Innendurchmesser des Gefäßes beträgt 140 mm und die Spannweite des Rührers 108 mm. Ähnliche Apparate werden in größerem Maßstab in der Industrie eingesetzt, um in partikelreichen Suspensionen, etwa Säften mit Fruchtfleisch, eine gleichmäßige Verteilung der Feststoffe sicherzustellen. Hochkonzentrierte wässrige Natriumiodid-Lösung (64%w/w NaI) mit einer Dichte von 1850 kg/m³ und einer newtonschen Viskosität (gemessen) von 3,5 mPas bei Raumtemperatur wird zunächst als flüssiges Medium verwendet (Lösung A). Der gemessene Brechungsindex (n) beträgt 1,495. Anschließend kommt eine wässrige Lösung mit 42%w/w Natriumiodid und 27%w/w Saccharose mit einer Viskosität von etwa 23,5 mPas (n=1,497) zum Einsatz (Lösung B). Partikel werden durch Verfestigung der Lösung A mit Hydrokolloiden hergestellt. Erste Versuche, Gele herzustellen, die die mechanischen Eigenschaften von Fruchtfleisch aufweisen, basierten auf κ -Carrageenan wegen seiner in der Literatur beschriebenen hervorragenden Geliereigenschaften (Belitz, et al., 2008; Campo, et al., 2009; Rochas, 1984), aber bei der vorliegenden hohen Konzentration von Natriumiodid entstehen sehr viel schwächere Gele. Daher wurden mehrere Kombinationen mit anderen Hyd-

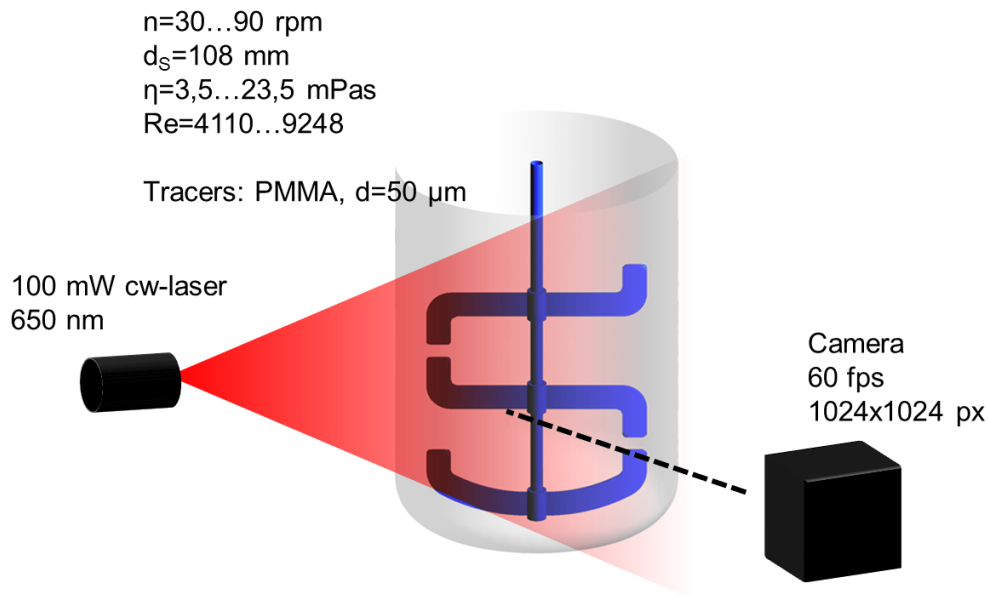


Abb. 1: Aufbau der Rührversuche mit PIV-System

rokolloiden getestet. Für die meisten davon hemmt eine hohe Salzkonzentration die Verfestigung; außerdem sorgt die hohe Konzentration von Iodid-Ionen in vielen Fällen für eine dunkle Verfärbung ähnlich einer Iod-Stärke-Reaktion. Eine Kombination aus Johannisbrotkernmehl und κ -Carrageenan lieferte von vielen verschiedenen Ansätzen zufriedenstellende Eigenschaften. Folgende Hydrokolloide lieferten eindeutig unzureichende Ergebnisse: Agar-Agar, Gelatine, Guar und Xanthan. Zur Herstellung der Gelpartikel wird Lösung A mit 0,2% Johannisbrotkernmehl und 0,2% κ -Carrageenan verdickt ($n=1,496$). Dieser Ansatz wird erhitzt, zwei Minuten lang gekocht, in eine Form gegossen und nach dem vollständigen Erkalten durch ein Sieb von 2 mm Maschenweite gedrückt, damit sich eine Partikelgrößenverteilung um einen Durchmesser von etwa 2 mm herum einstellt.

2.3 Aufbau und Parameter

Zunächst wird nur Lösung A ohne Zugabe von Partikeln gerührt und die gewonnenen Messwerte werden mit den entsprechenden Ergebnissen der Simulationen verglichen. PMMA-Partikel mit einem mittleren Durchmesser von $d=50$ μm werden als Tracer verwendet. Das gerührte Volumen wird mit einem 100 mW-Linienlasermodul (Dauerstrich) bei einer Wellenlänge von 650 nm in der zentralen vertikalen Ebene des Gefäßes beleuchtet, sodass das Licht die Rührerwelle der Länge nach schneidet. Aufnahmen werden mit einer Photron Fast-Cam AX 100 Mini bei einer Bildrate von 60 fps so angefertigt, dass immer genau zehn Umdrehungen in Folge aufgenommen werden. Die Auswertung erfolgt hier und im Folgenden mit PIVlab, dem PIV-Modul von MATLAB (MATLAB, 2016; Thielicke, et al., 2016) in drei Iterationsschritten mit den jeweiligen Suchfenstergrößen von 128, 64 und 32 Pixeln sowie dazugehörigen Schrittweiten von 64, 32 und 16 Pixeln. Sowohl Größenordnung der Geschwindigkeitsbeträge als auch deren Verteilung in der betrachteten Ebene passten sehr gut zusammen. Anschließend wurden zweiphasige Versuche unter Zugabe von Partikeln durchgeführt. Zur Bewertung der Auswirkungen von Viskosität, Partikelanteil und Drehzahl wird ein statistischer Versuchsplan aufgestellt (drei Faktoren, je zwei Stufen) (Siebertz, et al., 2010). Tab. 1 fasst die gewählten Faktoren und ihre Einstellungen zusammen. Die niedrige Viskosität entspricht dabei der Lösung A, die höhere der Lösung B. Der Partikelanteil wird jeweils über vorbereitete Mengen einer Suspension mit 50% Partikeln eingestellt, von der in der

niedrigen Einstellung 20% des Ansatzvolumens mit 80% der jeweiligen homogenen Lösung gemischt werden; in der hohen Einstellung wird nur die Suspension mit 50% Partikelanteil verwendet. Als Qualitätsgrößen werden Geschwindigkeitsbetrag [m/s], Dehnrate [1/s] und Scherrate [1/s] betrachtet.

Tab. 1: Faktoren und ihre Einstellungen im statistischen Versuchsplan

Faktor/Parameter	Einstellung hoch(+)	Einstellung niedrig (-)	Einheit
Viskosität	23,5	3,5	mPas
Partikelanteil	50%	10%	v/v
Drehzahl	90	30	rpm

3 Simulation

Die Strömungssimulation einer Suspension mit makroskopischen Partikeln stellt eine Herausforderung dar, weil etablierte Ansätze in zweiphasiger CFD-Modellierung deren mechanische Eigenschaften nur unzureichend abbilden können. Der Euler-Lagrange-Ansatz stellt die Partikel herkömmlicherweise als Punktmassen dar und ist somit nur bei niedrigen Volumenanteilen der partikulären Phase anwendbar. Dies stellt also keine Lösung für Situationen dar, in denen der Volumenanteil der Partikel bis zu 50% beträgt und ihr mittlerer Durchmesser mehrere Millimeter betragen kann, sodass die Partikel zwangsläufig miteinander kollidieren. Der Euler-Euler-Ansatz hingegen berücksichtigt überhaupt keine einzelnen Partikel und behandelt beide Phasen als einander durchdringende Kontinuen. Wie auch der Euler-Lagrange-Ansatz wurde er nicht mit dem Ziel entwickelt, Partikel zu simulieren, deren Abmessungen die Zellgrößen der Simulationsgitter überschreiten. Partikelkollisionen werden nicht direkt simuliert und müssen durch zusätzliche Modelle abgebildet werden, die in der Regel nur annähernd genau sind. Simulationen dieser Art können daher nur einen Teil der gewünschten Informationen liefern.

Die konventionellen Simulationsmodelle erfüllen die Anforderungen der gegebenen Untersuchung nicht. Daher wird eine hybride Methode eingesetzt, die das Strömungsfeld mit einer konventionellen Euler-Euler-CFD ermittelt und gleichzeitig eine Diskrete-Elemente-Modellierung einsetzt, um Partikel-Partikel- sowie Partikel-Geometrie-Kollisionen zu berechnen und so mechanische Kräfte zu erhalten. Die Ergebnisse beider Simulationen werden dann gekoppelt, um die Fluid-Partikel-Wechselwirkungen darzustellen. Es wird ein Tank von 2300 Liter Fassungsvermögen modelliert, der Partikel von 0,6 cm Durchmesser bei einem Volumenanteil von 1% enthält. Die Rührströmung wird mit einer Reynolds-Zahl von 44600 charakterisiert. Sie erzeugt ein klar erkennbares Gebiet geringer Partikel-Dichte durch Kollisionen und eine zyklonartige (spiralförmige) Strömung. Das Verhältnis von Gitterweite und Partikeldurchmesser ist ein limitierender Faktor bei diesem Ansatz und die Übertragung auf größere Partikel problematisch. Trotzdem können die Ergebnisse als Grundlage verwendet werden, um die Euler-Euler-Simulation zu erweitern. Wie Abb. 2 zeigt, werden die Verteilungsmuster der Partikel mit konventioneller CFD alleine grundsätzlich anders vorhergesagt als mit CFD-DEM-Kopplung. Durch den Kopplungsansatz können Kollisionen lokalisiert und die auftretenden Kräfte bestimmt werden. Diese Daten werden genutzt, um zu untersuchen, welche Strömungsparameter die auftretenden Kollisionen charakterisieren. Die Antworten werden verwendet, um die Impulsgleichungen des Euler-Euler-Ansatzes für mehrphasige Simulationen zu erweitern. Kollisionen konzentrieren sich an denselben Stellen, an denen auch hohe Geschwindigkeitsgradienten auftreten. Die räumliche Verteilung der Kollisionskräfte zeigt außerdem, dass die stärksten Ereignisse (mit dem höchsten Potential für schädigende Effekte) im Nachlauf der Rührerarme auftreten. Die Scherraten sind an den Kanten des Rührers am höchsten und die Positionen der kraftvollsten Zusammenstöße fallen mit den Gebieten hoher Scherraten zusammen (hohe Geschwindigkeitsgradienten im Strömungsfeld führen zu Kollisionen).

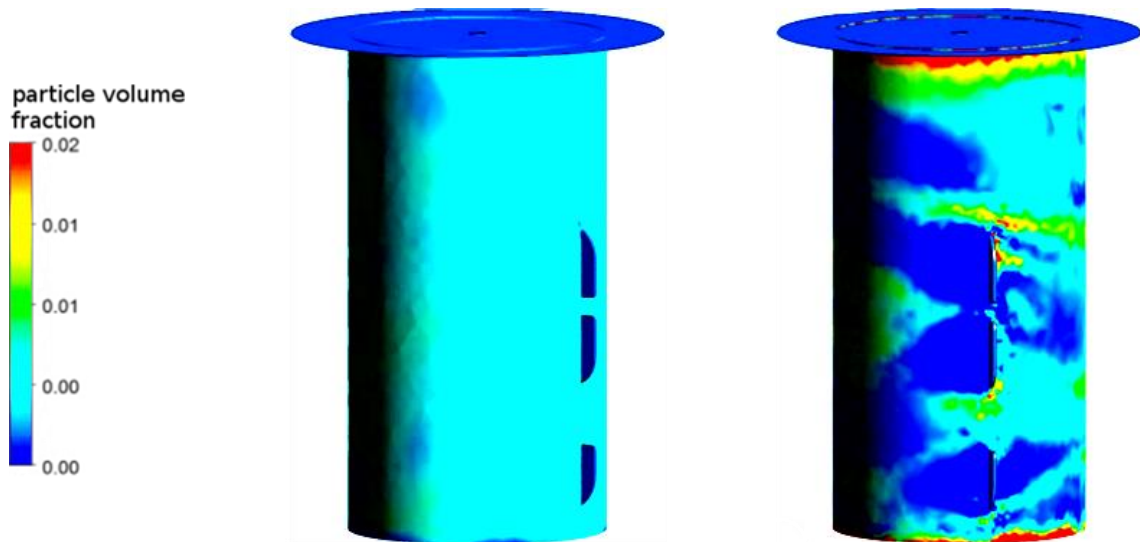


Abb. 2: Vorhersage von Partikelverteilungsmustern durch klassische CFD (links) und CFD-DEM-Kopplung (rechts) für die gleiche Suspension jeweils nach 4 Sekunden simulierter Rührzeit.

4 Ergebnisse

In einphasigen Rührversuchen ist eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Geschwindigkeitsverteilungen beobachtet worden, wobei die Geschwindigkeitsbeträge in beiden Verteilungen bis zu 65 mm/s reichten. Abb. 3 verdeutlicht, dass sich in einem zweiphasigen Versuch die absoluten Geschwindigkeiten noch immer in der gleichen Größenordnung befinden. In Lösung B wird teilweise, gerade bei höheren Partikelanteilen, eine starke Verklumpung der Partikel beobachtet. Die nach dem statistischen Versuchsplan ermittelten Effekte sind in Abb. 4 dargestellt. Die dafür verwendeten Werte werden auf folgende Weise ermittelt: Für jede Faktorkombination wurden im Versuch zehn Umdrehungen bei 60 fps aufgenommen. Für alle dabei gewonnenen Bildpaare werden Geschwindigkeitsverteilungen (vergleichbar mit Abb. 3) berechnet. Aus den Geschwindigkeitsvektoren werden die Dehn- und Scherraten (Beträge) in der betrachteten Ebene bestimmt. Da es sich um Belastungsparameter handelt, die letztendlich minimiert werden sollen, sind bei der Auswertung

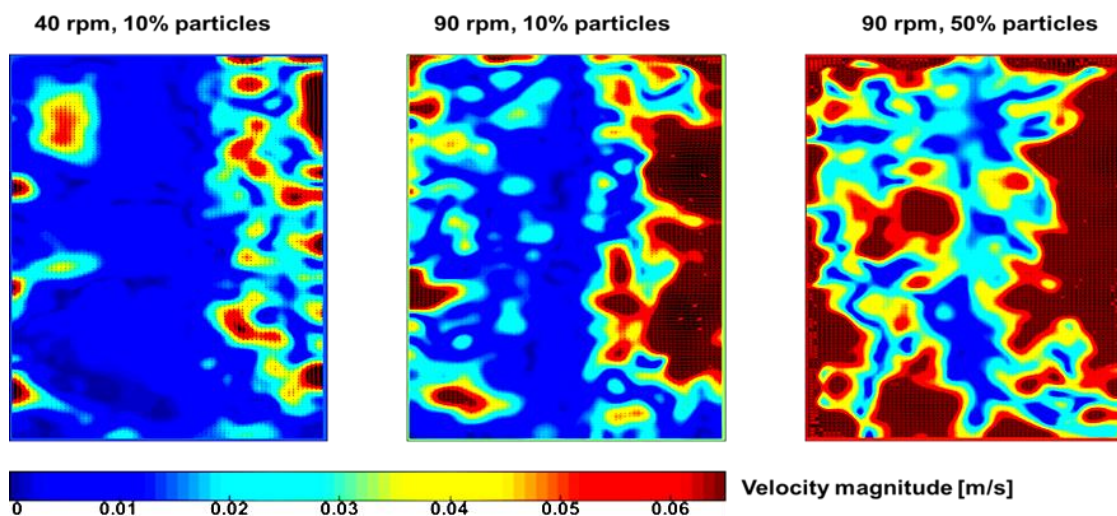


Abb. 3: Verteilungen der Geschwindigkeitsbeträge für drei verschiedene Kombinationen von Parametern in Lösung A

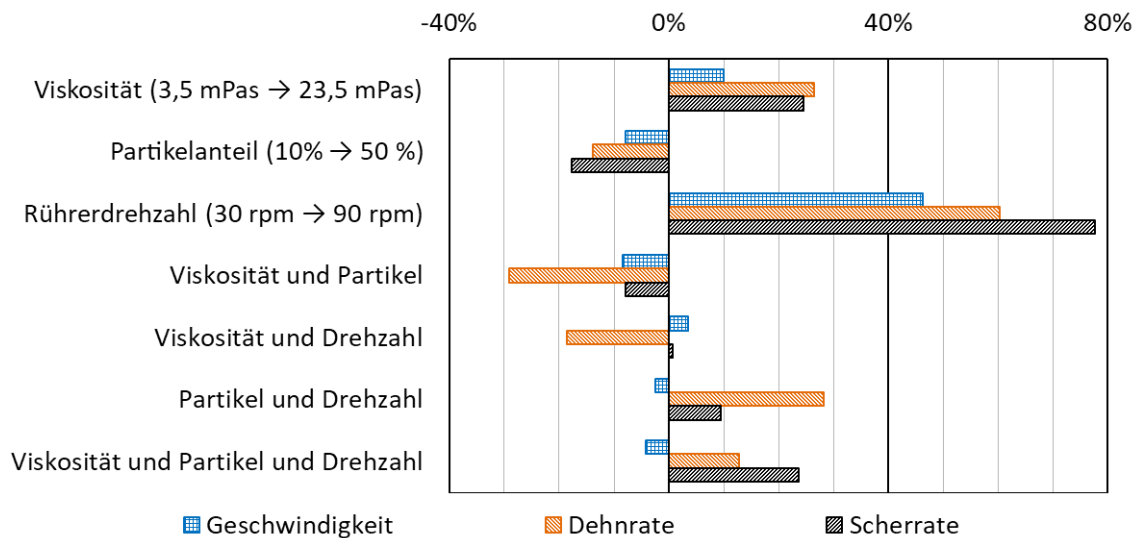


Abb. 4: Effekte der betrachteten Prozessparameter auf das Maximum des Geschwindigkeitsbetrages sowie der Dehn- und Scherrate.

grundsätzlich die Maximalwerte interessanter als die Mittelwerte, sodass als Effekt die Veränderung der Maximalwerte betrachtet wird. Die berechneten Effekte werden normiert, indem durch den Mittelwert der jeweils niedrigen Faktoreinstellung geteilt wird. Die Standardabweichungen der Mittelwerte, die für die Effektberechnung verwendet werden bezogen auf den jeweiligen Maximalwert liegen zwischen 0,05 und 0,12. Der Vergleich der Effekte zeigt, dass die Erhöhung der Rührerdrehzahl offenbar die größte Steigerung von Geschwindigkeit (46,2%), Scherung (60,2%) und Dehnung (77,6%) bewirkt. Unerwartet ist, dass die Erhöhung des Partikelanteils alle drei Größen leicht senkt (zwischen 8% und 18%) und dass vom schwächer zum stärker viskosen Fluid eine Steigerung (zwischen 10% und 27%) ermittelt wird. Möglicherweise hat das Partikelkollektiv eine dämpfende Wirkung auf die Energieverteilung innerhalb des strömenden Fluids. Der Einfluss der hohen Viskosität könnte damit zusammenhängen, dass das zwischen den Partikeln hindurchströmende Fluid bei der gleichen Drehzahl höheren Geschwindigkeitsdifferenzen ausgesetzt ist. In den Interaktionseffekten ist nur der Einfluss auf Dehn- und Scherrate deutlich erkennbar. Besonders auffällig ist hier, dass die Interaktion von Viskosität und Drehzahl, die isoliert jeweils einen steigernden Effekt auf alle drei Qualitätsgrößen hatten, hier einen stark senkenden Einfluss auf die Dehnrate ausübt.

Erste CFD-DEM-Simulationsdurchläufe deuten darauf hin, dass Ort und Kraftbetrag der Kollisionen und sogar die Verteilung des Volumenanteils der Partikel mit Strömungsparametern wie etwa dynamischem Druck und Geschwindigkeitsgradienten korreliert werden können.

5 Ausblick

Als nächste experimentelle Schritte sollen weitere Rührergeometrien untersucht werden, dabei vorzugsweise solche Bauarten, die in der Industrie eine Rolle spielen. Die Fertigung ausgefallener Formen aus PMMA bei vertretbaren Kosten ist dabei schwierig, sodass gegebenenfalls auf andere Möglichkeiten der optischen Anpassung zurückgegriffen wird. Darüber hinaus wird es zu ähnlichen Versuchsreihen am Produkt selbst kommen, also an realen Fruchtzubereitungen anstelle der nach optischer Kompatibilität ausgewählten Modellsysteme. Nach Möglichkeit werden auch noch weitere Ausschnitte des gerührten Volumens und insbesondere andere Blickwinkel untersucht.

Als nächster Schritt in der Modellierung wird die Impulsgleichung um eine Korrekturfunktion erweitert, um die im Phasenkopplungsterm enthaltene Trägheitskraft zu modifizieren und

Kollisionseffekte genauer zu berücksichtigen. Damit wird schließlich das modifizierte Euler-Euler-Simulationsmodell einer stückigen Fruchtzubereitung vervollständigt. Eine Erweiterung der Anwendbarkeit des Simulationsmodells auf Apparatur-Interaktionen und Kollisionen muss entweder zusätzliche Quellterme berücksichtigen oder die konventionelle CFD mit einer DEM-Simulation koppeln. Falls sich dies als nicht machbar herausstellt, ist als eine nützliche Alternative die Aufteilung der partikulären Phase in Größenklassen denkbar, wobei jede Größenklasse wie eine Phase gerechnet würde (Populationsbilanzen-Ansatz). In diesem Fall würden die Übergänge zwischen den Größenklassen entsprechend der Belastungshistorie errechnet werden. Scherung, Dehnung und Kollisionen müssen in Form einer Kennzahl berücksichtigt werden, die noch zu definieren ist. Die Ergebnisse könnten dann auch durch konventionelle Siebanalyse oder Partikel-Bildanalyse validiert werden. Anschließend steht die Verallgemeinerung der gewonnen Erkenntnisse in Form von Kennzahlen und Charakteristiken bevor.

Dankesworte

Wir bedanken uns für die Finanzierung unserer Forschung in Form eines IGF-Projekts der AiF (Projekt Nr. AiF 19011N) vom Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI) Bonn; außerdem danken wir dem Deutschen Institut für Lebensmitteltechnik (DIL) für die gute Zusammenarbeit.

Literatur

- ANSYS. 2015.** Fluent 16 Theory Guide. s.l. : ANSYS Inc., 2015.
- Bai, K. und Katz, J. 2014.** On the refractive index of sodium iodide solutions for index matching in PIV. *Experiments in Fluids (Vol 55)*. 2014, S. 1704 ff.
- Belitz, H.-D., Grosch, W. und Schieberle, P. 2008.** *Lehrbuch der Lebensmittelchemie*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2008.
- Berk, Zeki. 2013.** Chapter 7 - Mixing, In Food Science and Technology. *Food Process Engineering and Technology (Second Edition)*. San Diego : Academic Press, 2013, S. 193-216.
- Budwig, R. 1994.** Refractive index matching methods for liquid flow investigations. *Experiments in Fluids (Vol 17)*. 1994, S. 350-355.
- Byron, Margaret L. und Variano, Evan A. 2013.** Refractive-index-matched hydrogel materials for measuring flow-structure interactions. *Experiments in Fluids (Vol. 54)*. 2013, S. 1456ff.
- Campo, V. L., et al. 2009.** Carrageenans: biological properties, chemical modifications and structural analysis - a review. *Carbohydrate Polymers (Vol 77)*. 2009, S. 167-180.
- Cui, M. M. und Adrian, R. J. 1994.** Refractive index matching and marking methods for highly concentrated solid-liquid flows. *Experiments in Fluids (Vol 22)*. 1994, S. 261-264.
- Daviero, G., Roberts, P. J. und Maile, K. 2001.** Refractive index matching in large-scale stratified experiments. *Experiments in Fluids (Vol 31)*. 2001, S. 119-126.
- Díez Robles, L. 2009.** Novel Hybrid Methods Applied for the Numerical Simulation of Three-Phase Biotechnological Flows. [Dissertation]. Erlangen : Universität Erlangen-Nürnberg, 2009.
- Franklin, Jeffrey und Wang, Zhi Yuan. 2002.** Refractive Index Matching: A General Method for Enhancing the Optical Clarity of a Hydrogel Matrix. *Chemistry of Materials (Vol. 14)*. 2002, S. 4487-4489.
- Kraft, A.-L. 2012.** Charakterisierung der Beanspruchungsmechanismen scherempfindlicher Stoffsysteme im Rührprozess. [Masterarbeit]. Neubrandenburg : Hochschule Neubrandenburg, 2012.
- MATLAB. 2016.** MATLAB and Image Processing Toolbox Release 2016b. Natick, Massachusetts, USA : The Mathworks Inc., 2016.
- Moreira, L .R. S. und Filho, E. X. F. 2008.** An overview of mannan structure and mannan-degrading enzyme systems. *Applied Microbiology and Biotechnology (Vol 79)*. 2008, S. 165-178.
- Polyanskiy, M. 2017.** Refractive Index Info. <https://refractiveindex.info/> : last accessed 15/05/2017, 2017.
- Raffel, M., et al. 2007.** *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2007.
- Rochas, C.: Rinaudo, M. 1984.** Mechanism of gel formation in k-Carrageenan. *Biopolymers (Vol 23)*. 1984, S. 735-745.

- Siebertz, Karl, van Bebbber, David und Hochkirchen, Thomas. 2010.** *Statistische Versuchsplanung*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010.
- Thielicke, W. and Stamhuis, E. J. 2016.** PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATALB. Latest version v1.4 : s.n., 12 02 2016.
- Wiederseiner, S., et al. 2011.** Refractive-index and density matching in concentrated particle suspensions: a review. *Experiments in Fluids (Vol 50)*. 2011, S. 1183-1206.
- Yu, G., et al. 2002.** Structural studies on k-Carrageenan derived oligosaccharides. *Carbohydrate Research (Vol 337)*. 2002, S. 433-440.
- Zima-Kulisiewicz, B.E. 2008.** *Einfluss von fluiddynamischen Effekten auf granularen Belebtschlamm*. Erlangen : Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2008.