

Numerische und experimentelle Untersuchung mechanischer Belastungen bei der Verarbeitung stückiger Fruchtzubereitungen

Numerical and experimental investigation of mechanical loads in the processing of chunky fruit preparations

Lennart Vulprecht, Thies Wölken, Cornelia Rauh

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

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

Kurzfassung

In der Herstellung von stückigen Fruchtzubereitungen sind die Rohstoffe (Früchte, Fruchtstücke) einer Vielfalt von Einflüssen ausgesetzt. Speziell in Rührprozessen kann es zu starken Beeinträchtigungen kommen, die sich direkt auf die Qualität der Endprodukte auswirken. Wechselwirkungen zwischen Partikeln und strömendem Fluid, Partikeln miteinander sowie Partikeln und Teilen des Prozessapparats sind wesentlich für die mechanische Beschädigung verantwortlich. Die zugrunde liegenden Mechanismen und ihr genauer Einfluss sind nicht vollständig verstanden, wodurch es schwierig ist, die Zerstörung dieser Partikel vorherzusagen und durch geschickte Prozessgestaltung zu verhindern.

Mit einer Kombination numerischer Simulationen und strömungsmechanischer Experimente werden diese Einflüsse auf mechanisch empfindliche Partikel untersucht. In den Experimenten wird ein industrieller Rührprozess nachgestellt, um Zusammenhänge und Wirkungsweisen der verschiedenen mechanischen Belastungen zu ermitteln. In PIV-Messungen werden Geschwindigkeitsfelder ermittelt, die Aufschluss über die Belastung der Partikel durch Scher-, Dehn- und Druckeffekte geben. Durch die Ableitung von Spannungsfeldern wird erkennbar, an welchen Stellen im Prozess Belastungsgrenzen überschritten werden, die fruchtspezifisch ermittelt werden. Um die Verlässlichkeit der optischen Signale zu verbessern, wird ein Versuchsaufbau erarbeitet, in dem alle Komponenten des Rührprozesses transparent und brechungsindexangepasst sind. Hierfür werden mit Natriumiodid angereicherte Hydrokolloidgele entwickelt, die die mechanischen Eigenschaften von Fruchtstücken abbilden sollen.

Die Erkenntnisse werden genutzt, um numerische Modelle der Strömungsvorgänge im Rührprozess zu validieren, auf deren Grundlage ein Leitfaden für die optimale Gestaltung der betreffenden Rührprozesse entsteht. Ergebnisse erster Vorversuche im vereinfachten Aufbau zeigen gute Übereinstimmungen der Simulation mit den Messwerten. Ein Modell zur Beschreibung verformungsweicher, suspendierter Partikel wird erarbeitet, mit dem eine umfassende Beschreibung des zweiphasigen Systems möglich ist.

Einleitung

Rührprozesse in der Lebensmittelindustrie können unterschiedlichen Prozesszielen dienen. Zu den wichtigsten gehören das Homogenisieren, das Suspendieren und die Wärmeübertra-

gung. Im Kontext der vorgestellten Forschung geht es um Herstellungsprozesse stückiger Fruchtzubereitungen, in denen Rühren prinzipiell zu allen dieser drei Ziele eingesetzt wird:

- Zucker und Verdickungsmittel sollen gleichmäßig verteilt werden, um sich möglichst schnell zu lösen (Homogenisieren).
- Früchte oder Fruchtstücke sollen gleichmäßig verteilt werden/bleiben um das Produkt entsprechend gleichmäßig abzufüllen (Suspendieren).
- In thermischen Behandlungsschritten soll das Produkt gleichmäßig vermischt werden, um den bestmöglichen Wärmetransport zu ermöglichen (Wärmeübertragung).

Gerührt wird in der Regel in Kesseln mit gewölbten Böden und einem oder mehreren Agitatoren sehr unterschiedlicher Bauweisen. Die Kesselwand kann außerdem mit Strombrechern bestückt sein. Im Zentrum der präsentierten Forschung steht nicht nur die Rührströmung selbst, sondern insbesondere ihr Einfluss auf mechanisch empfindliche Partikel makroskopischer Abmessungen (10^{-3} bis 10^{-2} m). Erfahrungen zeigen, dass mechanisch empfindliche Partikel wie Früchte oder Fruchtstücke durch mechanische Beanspruchungen in ihrer Form beeinträchtigt werden. Für die Qualität der Fruchtzubereitungen als Endprodukte ist die mechanische Unversehrtheit allerdings von hoher Bedeutung, wodurch ein Interesse besteht, Rührprozesse so zu gestalten, dass die Partikel möglichst intakt bleiben. Es soll also ein Kompromiss gefunden werden zwischen der Einhaltung fest vorgegebener Prozessziele (Pasteurisierung, Gelierung der Verdickungsmittel) und der Intaktheit der enthaltenen Partikel. Als mögliche Ursachen für Partikelzerstörungen werden die folgenden Wechselwirkungen identifiziert:

- Partikel interagieren mit der strömenden Flüssigkeit.
- Partikel interagieren miteinander (Kollision).
- Partikel interagieren mit dem Prozessapparat (Agitatoren oder Wand).

Um diese Wechselwirkungen im Inneren des Rührkessels genauer zu verstehen, werden die erwarteten Strömungsfelder numerisch simuliert. Zunächst wird nur das Strömungsfeld eines speziellen, nach industriellen Vorgaben angefertigten Rührers analysiert. Durch fluidmechanische Experimente erfolgt eine Validierung der numerischen Modelle und, wo nötig, eine Anpassung von entsprechenden Parametern.

Literaturübersicht

Rührströmungen wurden und werden mit verschiedenen Methoden, darunter auch strömungsmechanischen, ausgiebig untersucht. Ein Überblick über die Literatur hierzu würde den Rahmen dieser Einleitung sprengen; Kraume, M. (hrsg.), 2003 deckt den Bereich recht umfassend ab. Particle Image Velocimetry ist ein beliebtes Werkzeug zur Untersuchung von strömungsmechanischen Phänomenen; eine hilfreiche Einführung bieten etwa Raffel, M. et al., 2007. Brechungsindexanpassung ist ein verbreitetes Hilfsmittel, um die Zuverlässigkeit optischer Signale zu verbessern oder überhaupt einen hinreichenden Empfang zu gewährleisten. Die Auswahl geeigneter Werkstoffe für transparente Versuchsapparate beschrieb etwa Budwig, R., 1994. Im Zusammenhang mit Partikeln in Strömung stellten Cui, M. M., Adrian, R. J. 1994 den Einsatz verschiedener organischer Flüssigkeiten vor. Zur Untersuchung von makroskopischen Schichtenströmungen setzten Daviero, G. J. et al. 2001 Natriumchlorid und Ethanol ein. Der Einsatz wässriger Natriumiodidlösung zur Anpassung einer fluiden Phase an PMMA-Apparate beschreiben unter anderem Bai, K., Katz, J., 2014. Das teilweise unlösbare Problem der gleichzeitigen Anpassung von Brechungsindex, Dichte und ggf. Temperatur wird von Wiederseiner, S. et al. 2011 diskutiert und in einer Reihe von Expe-

rimenten untersucht. Dabei wird eine Vielzahl organischer Polymere eingeführt, jeweils für die Kombination mit niedrig oder hoch brechenden Fluiden geeignet.

Modellierung und Simulation

Die transienten Simulationen des Rührprozesses werden mit der Software ANSYS Fluent 16.2 durchgeführt, die räumliche Diskretisierung der Geometrie erfolgt mit ANSYS ICEM CFD 16.2. Da die Rührarme der Referenzgeometrie in den oberen beiden Ebenen nicht achsensymmetrisch sind (Abb. 1), kann die Geometrie für die Simulation nicht reduziert werden. Die Ergebnisse sind auf einem Gitter von etwa sieben Millionen Zellen berechnet. Zur korrekten Auflösung starker Gradienten an Geometriewänden wird hier eine feinere Auflösung des Gitters durch sechs Schichten von Prismen erzeugt. Im restlichen Volumen wird die Geometrie durch Tetraeder diskretisiert.

Um die Rotation des Rührers zu simulieren, wird die Sliding-Mesh-Methode von Fluent verwendet. Diese rechnerisch aufwendige Methode wird gewählt, da sie eine direkte Berechnung der zeitlichen Entwicklung der transienten Strömung im Rührprozess ermöglicht. Der gesamten Geometrie wird eine Rotationsbewegung vorgegeben, die an den Wänden des Rührers auf das Fluid übertragen wird. Da sich die Wände des Rührers nicht relativ zum rotierenden Referenzsystem bewegen, kann dort eine Wandhaftbedingung gesetzt werden. Bei diesem Vorgehen muss berücksichtigt werden, dass auch die Gefäßwand mitrotiert. Um dieses ungewünschte Verhalten auszugleichen wird an dieser Wand als Randbedingung eine im Betrag der Rotation entsprechende aber ihr entgegenwirkende Geschwindigkeit vorgegeben.

Dieses Vorgehen ist nur auf Grund der simplen Behältergeometrie ohne Einbauteile wie Stromstörer möglich, da so stets die notwendige entgegenwirkende Geschwindigkeit in Betrag und Richtung an jeder Stelle der Behälterwand bekannt ist.

Experimente

Gerührt wird mit einem Rührer, der nach Vorlagen von Industriepartnern aus Polymethylmethacrylat (PMMA) angefertigt wurde in einem Modellkessel mit Klöpperbodenform, ebenfalls aus PMMA. Die Apparatur ist in Abb. 1 mit den wichtigsten Abmessungen dargestellt.

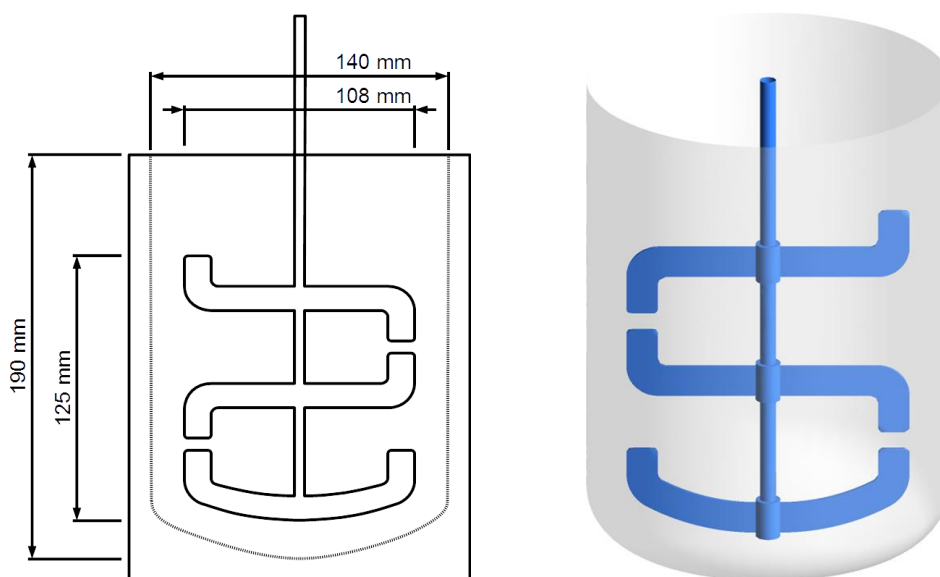


Abb. 1: Links schematischer Aufbau für Rührerexperimente (alle abgebildeten Teile aus PMMA), rechts Darstellung der Simulationsgeometrie

Das gerührte Fluid ist eine wässrige Lösung mit 64%w/w Natriumiodid (NaI), deren Brechungsindex mit einem kalibrierten Abbe-Refraktometer zu 1,49 bestimmt wurde, was dem Brechungsindex von PMMA entspricht (Polyanskiy, M., 2016). Die Viskosität der Lösung wird rheometrisch zu konstant 3,5 mPas bestimmt (newtonsches Fließverhalten). Als Tracer-Material werden weiße PMMA-Partikel mit einer mittleren Größe von 50 μm zu einem Gewichtsanteil von etwa 0,05% eingesetzt. Beleuchtet wird kontinuierlich mit einem Linien-Lasermodul (100 mW, 650 nm), die Aufnahmen werden mit einer Photron FASTCAM Mini AX100 bei einer Bildrate von 60 fps in einer Auflösung von 1024 mal 1024 Pixeln angefertigt. Die Beleuchtung erfolgt entlang des Durchmessers durch die Rührwelle hindurch, aufgenommen wird senkrecht zur beleuchteten Ebene.

Die Rührerexperimente werden bei Werten der Rührer-Reynolds-Zahl von rund 4120 durchgeführt, was bei den gegebenen Geometrie- und Materialparametern einer Drehzahl von 40 rpm entspricht. Die Auswertung erfolgt mithilfe von ImageJ/FIJI, dem ImageJ-PIV-Plugin und MATLAB mit dem Modul PIVlab. Zur Kalibrierung der Längen wird die reale Länge der Rührarme bestimmt und der abgebildeten Länge zugeordnet. Die Zeitschritte zwischen den Bildern je eines Bildpaars betragen ca. 16,67 Sekunden (entsprechend der Bildrate). Die PIV-Auswertung läuft in drei Durchgängen mit den Fenstergrößen (quadratisch) von 128 Pixeln (Schrittweite: 64 Pixel), 64 (32) und 32 (16) Pixeln ab. Im Post-Processing wird nach der 3-fachen Standardabweichung gefiltert, fehlende Vektoren werden interpoliert und die Verteilung wird mithilfe quadratischer Fehlerminimierung geglättet.

Ergebnisse und Diskussion

Die in der Simulation vorhergesagten Strömungsstrukturen, insbesondere Wirbel, lassen sich teilweise in den experimentellen Ergebnissen wiederfinden. Abb. 2 stellt gemessenes und simuliertes Geschwindigkeitsfeld für eine Rührerstellung von 240° ab der Ausgangsstellung gegenüber. Vergleicht man die Verteilungen der Geschwindigkeitskomponenten (Abb. 3 und 4), sind die Messwerte erwartungsgemäß stark verrauscht. Die berechneten Werte sind außerdem sehr viel dichter und enthalten deutlich mehr Vektoren, bei denen eine Komponente verschwindet (kreuzförmige Struktur in der Mitte).

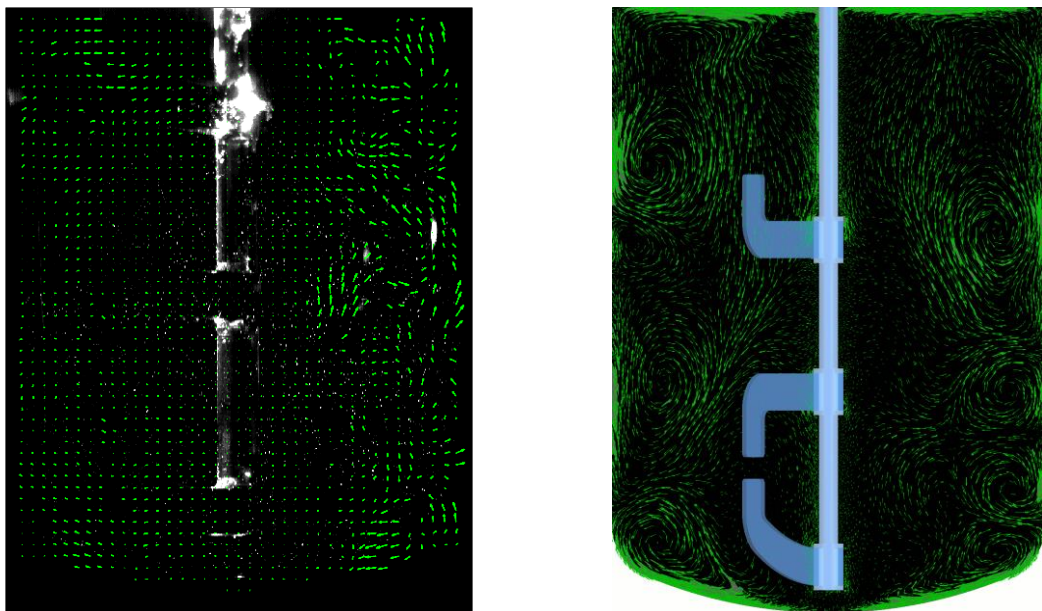


Abb. 2: Geschwindigkeitsverteilung, links Simulation, rechts Experiment

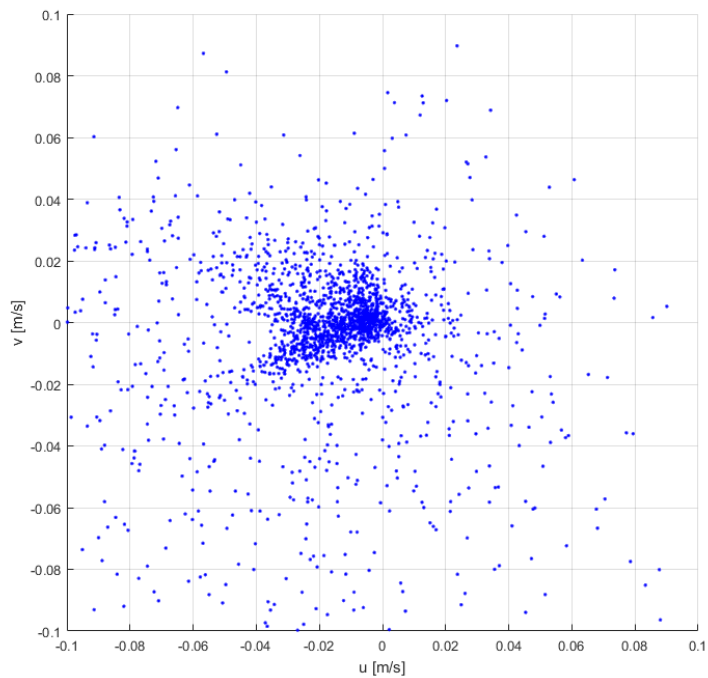


Abb. 3: Verteilung der Vektoren auf Geschwindigkeitskomponenten (Experiment)

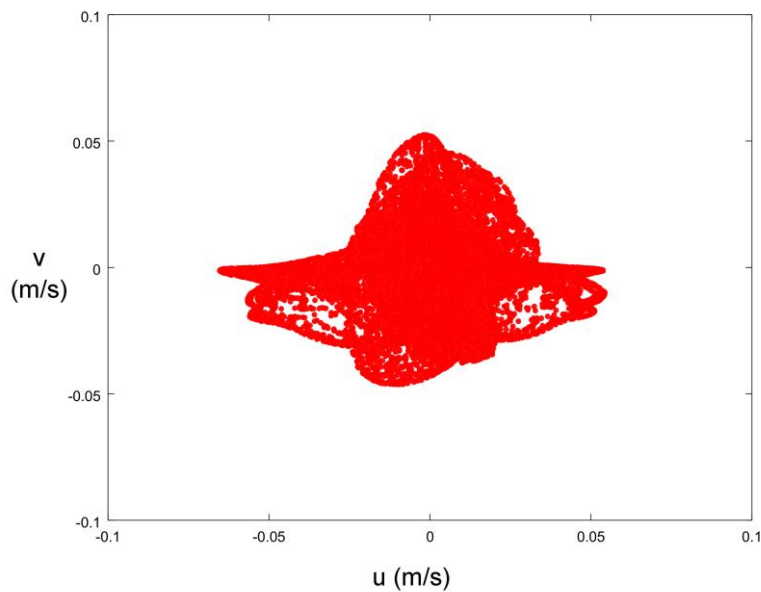


Abb. 4: Verteilung der Vektoren auf Geschwindigkeitskomponenten (Simulation)

Es muss beachtet werden, dass die PIV-Aufnahmen durch die gekrümmte Oberfläche des zylindrischen Rührbehälters optisch verzerrt sind. Die Verzerrung verursacht zwischen Bildmitte und Bildrändern eine variable horizontale Längenänderung von bis zu 20% und kann durch Matching und Skalierung nicht vollständig korrigiert werden. Insofern werden die Geschwindigkeiten am Rand überschätzt. In zukünftigen Experimenten wird versucht, die Ver-

zerrung durch optische Adapter auszugleichen, die das beobachtete System in einen gleichmäßig brechenden Quader umwandeln.

Zusammenfassung und Ausblick

Der transiente Rührprozess im einphasigen System kann mit dem vorgestellten Vorgehen modelliert werden. Das Modell kann direkt auf industrielle Maßstäbe skaliert werden und ist damit für die Anwendung der Forschungsergebnisse geeignet. Die Entwicklung einer geeigneten Methodik zur Modellierung der partikulären Phase ist allerdings entscheidend für eine erfolgreiche Simulation des Rührprozesses stückiger Fruchtzubereitungen. Modelle wie die Immersed Boundary Method, die eine Simulation von relativ zur Zellgröße makroskopischen Partikeln ermöglichen, sind rechnerisch zu aufwendig für die Simulation eines industriellen Prozesses. Solch ein Ansatz kann daher nur genutzt werden, um die Interaktion von Fluid und Partikeln im Allgemeinen zu untersuchen und diese Erkenntnisse auf andere Modelle zu übertragen.

Wird hingegen die untersuchte Geometrie so groß gewählt, dass die einzelnen Gitterzellen eine gitterunabhängige Strömungssimulation gewährleisten und dabei die Größe der Fruchtstücke überschreiten, so stehen effizientere Modelle zur Auswahl. Durch Kopplung einer CFD-Simulation mit der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) kann simultan das Strömungsfeld durch die CFD-Software sowie Fruchtstückverteilung und Bewegung durch die DEM-Software berechnet werden. Die direkte Berechnung von Kollisionen zwischen Partikeln und von Partikeln und Geometrie basierend auf Newtonschen Bewegungsgleichungen ermöglicht eine Simulation der resultierenden Kräfte auf die Fruchtstücke.

Gleichzeitig wird ein Modellsystem zur Abbildung der Eigenschaften mechanisch empfindlicher Partikel entwickelt. Hierzu werden brechungsindexangepasste Hydrokolloidgele hergestellt und in den transparenten Versuchsaufbau eingefügt, mithilfe derer Strömungssituationen innerhalb einer gerührten stückigen Fruchtzubereitung in einem transparenten und gleichmäßig brechenden Modellsystem beobachtet werden können.



Abb. 5: Partikel aus einem Hydrokolloidgele, dessen Brechungsindex mit Natriumiodid auf ca. 1,49 eingestellt wurde (0,8%w/w κ -Carrageenan).

Ziel ist es, in einem Rührprozess mit einer Suspension mechanisch empfindlicher Partikel (Früchte oder Fruchtstücke) in Abhängigkeit von Prozessparametern und Kenngrößen des

Apparats die Zerstörung der Partikel vorherzusagen. Abb. 5 stellt ein Ergebnis der Versuche zur Entwicklung solcher Gele dar, die mit dem Verdickungsmittel Carrageenan und Nal-Löung angefertigt wurden. Die mechanische Belastbarkeit dieser Gele ist noch nicht mit der von Fruchtpartikeln vergleichbar. Eine Kombination mit Johannisbrotkernmehl hat bereits deutliche Fortschritte ergeben und die so gewonnenen Gele lassen sich mechanisch bereits mit erwärmten Apfelwürfeln vergleichen. So kann letztendlich mehr Klarheit über die Vorgänge in gerührten stückigen Fruchtzubereitungen gewonnen und eine Optimierung der entsprechenden Prozesse ermöglicht werden. Außerdem werden die Ergebnisse nützlich sein, um vergleichbare Betrachtungen in Bezug auf andere Industrieprozesse mit verwandten Problemstellungen anzustellen und zu sinnvollen Schlüssen zu gelangen.

Als abschließendes Produkt des Forschungsprojektes wird ein Leitfaden entstehen, auf dessen Grundlage Rührprozesse mit mechanisch empfindlichen Partikeln auf der Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse und im Rahmen ihrer Prozess-Freiheitsgrade so angepasst werden können, dass die Beeinträchtigungen der Partikel minimiert werden.

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 Inc., 2015: Fluent 16 Theory Guide

Bai, K., Katz, J., 2014: "On the refractive index of sodium iodide solutions for index matching in PIV.", *Exp Fluids* 55 (2014), pp. 1704 ff.

Belitz, H.-D., Grosch, W., Schieberle, P., 2008: "Lehrbuch der Lebensmittelchemie", Springer-Verlag 2008

Budwig, R., 1994: "Refractive index matching methods for liquid flow investigations", *Experiments in Fluids* 17 (1994), pp. 350-355

Campo, V. L., KaWano, D. F., da Silva J., D. B., Carvalho, I., 2009: "Carrageenans: biological properties, chemical modifications and structural analysis – a review", *Carbohydrate Polymers* 77 (2009), pp. 167–180

Cui, M. M., Adrian, R. J. 1994: "Refractive index matching and marking methods for highly concentrated solid-liquid flows", *Experiments in Fluids* 22 (1994), pp. 261-264

Daviero, G. J., Roberts, P. J. W., Maile, K., 2001: "Refractive index matching in large-scale stratified experiments", *Experiments in Fluids* 31 (2001), pp. 119-126

Díez Robles, L., 2009: "Novel Hybrid Methods Applied for the Numerical Simulation of Three-Phase Biotechnological Flows", Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2009

Elgobashi, S., 2006: "An Updated Classification Map of Particle-Laden Turbulent Flows." in: Balachandar S., Prosperetti A. (eds) *IUTAM Symposium on Computational Approaches to Multiphase Flow. Fluid Mechanics and Its Applications*, vol 81. Springer, Dordrecht, 2006

Hager, A., Kloss, C., Pirker, S., Goniva, C., 2012: "Parallel Open Source CFD-DEM for Resolved Particle-Fluid Interaction", Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, 2012

Kraume, M. (hrsg.), 2003: "Mischen und Rühren: Grundlagen und moderne Verfahren", Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2003

MATLAB and Image Processing Toolbox Release 2016b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States

Moreira, L.R.S., Filho, E.X.F. 2008: "An overview of mannan structure and mannan-degrading enzyme systems", *Applied Microbiology and Biotechnology* 79 (2008), pp. 165-178

Polyanskiy, M., 2016: "Refractive Index.Info", <http://refractiveindex.info/>, letzter Aufruf: 15.05.2017

Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S., Kompenhans, J., 2007: *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007

Rasband, W.S., 2016: ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2016

- Rochas, C., Rinaudo, M., 1984:** "Mechanism of gel formation in κ -carrageenan", *Biopolymers* 23 (1984), pp. 735-745
- Thielicke, W., Stamhuis, E. J. (2014):** "PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB (version: 1.41)", <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1092508>
- Tinevez, J.-Y., 2009:** PIV analyser (Fiji), http://imagej.net/PIV_analyser, Latest version v1.2 (20 April 2009)
- Wiederseiner, S., Andreini, N., Epely-Chauvin, G., Ancey, C., 2011:** „Refractive-index and density matching in concentrated particle suspensions: a review“, *Exp Fluids* 50 (2011), pp. 1183-1206
- Yu, G., Guan, H., Ioanoviciu, A.S., Sikkander, S.A., Thanawiroon, C., Tobacman, J.K., Toida, T., Linhardt, R.J., 2002:** "Structural studies on κ -carrageenan derived oligosaccharides", *Carbohydrate Research* 337 (2002), pp. 433-440
- Zima-Kulisiewicz, B.-E., 2008:** "Einfluss von fluiddynamischen Effekten auf granularen Belebtschlamm.", Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2008