Herstellung von Brechungsindexangepassten Zwei-Phasen-Modellstoffsysstemen zur Imitation von Fruchtzubereitungen für optische Strömungsmessungen

Production of refractive index adapted two-phase model fluids for the imitation of fruit preparations for optical flow measurements.

Bastian Eysel, Swetlana Schurr, Quan Phan, Christopher McHardy, Cornelia Rauh Fachgebiet Lebensmittelbiotechnologie und -prozesstechnik, Technische Universität Berlin, Berlin

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

Zusammenfassung

Fruchtzubereitungen finden in der Lebensmittelindustrie beispielsweise in Joghurt mit Fruchtzusätzen Anwendung. Hierbei stellen die Fruchtstücke als partikuläre Phase die wertvollste Komponente der Fruchtzubereitungen dar. Die Konsistenz und die Unversehrtheit der Fruchtstücke tragen in großem Maße auch zur Verbraucherakzeptanz bei. Somit ist beim Transport der Fruchtzubereitungen in Rohrleitungen darauf zu achten, dass die Schädigung der Fruchtstücke möglichst geringgehalten wird. Daher ist es von Interesse, das Beschädigungspotential verschiedener Rohrleitungseinbauten zu untersuchen und optische Strömungsanalvsen mittels PIV durchzuführen. Da die Fruchtzubereitungen und vor allem die Fruchtstücke nicht transparent sind, sind PIV-Messungen nicht direkt möglich. Abhilfe schaffen transparente Modellstoffsysteme, welche die Materialeigenschaften der flüssigen Phase sowie der partikulären Phase imitieren. Die Charakterisierung der flüssigen Phase verschiedener Muster zeigte Materialeigenschaften, die durch das Herschel-Bulkley-Modell beschrieben werden konnten. Die Fruchtstücke wurden in Texturanalysen mit allgemeinen Maxwell-Modellen sowie durch rheologische Untersuchungen charakterisiert. Zur Bildung transparenter Modellpartikel wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan angewendet, mit dem geeignete Rezepturen von Hydrogelen auf Carrageen-Basis bestimmt wurden. Es zeigte sich, dass K-Carrageen geeignet ist, um sehr klare Gele zu erzeugen. Die einzelnen Rezepturen zur Abbildung spezifischer Fruchtcharakteristika konnten anhand der Qualitätsparameter identifiziert werden. Eine Brechungsindexanpassung der flüssigen Phase erfolgte entsprechend der Brechungsindizes der Modellpartikel, wobei die Fließeigenschaften der Herschel-Bulkley-Fluide durch Verwendung von Carboxymethylcellulose oder Laponite® imitiert werden konnten. Die Dichten beider Phasen wurden dabei mit den typischen Dichtebereichen der Fruchtzubereitungen abgestimmt.

Einleitung

Als Fruchtzubereitungen werden gekochte Mischungen von geschnittenen oder ganzen Früchten mit zusätzlichen Zutaten wie beispielsweise Fruchtsäften, -pürees, Zucker und Hydrokolloiden bezeichnet. Bei diesen Mischungen ist der Erhalt der Frucht-typischen Form ein entscheidendes Qualitätskriterium, welches oft bezüglich der Diskrepanz zwischen der Abbildung auf der Verpackung und dem tatsächlichen Erscheinungsbild des Produktes bemängelt wird [Cariola 2004; Michel 2012; Uhlmann 2013]. Um den Erhalt der Frucht-typischen Form bei Transportprozessen zu bestimmen, soll der Einfluss von Rohrleitungseinbauten auf die Integrität der Früchte durch PIV Messungen untersucht werden. Da Fruchtzubereitungen starke Trübungen aufweisen und die Fruchtstücke undurchsichtig sind, ist eine PIV Messung in Fruchtzubereitungen nicht ohne Weiteres möglich. In der Praxis weisen Fruchtzubereitungen zudem Feststoffanteile von bis zu 70 % auf, sodass für PIV Messungen transparente und im Brechungsindex angepasste Modellpartikel notwendig sind.

In den Arbeiten von Vulprecht et al. 2017, Vulprecht et al. 2018 sowie Vulprecht et al. 2020 wurden bereits vergleichbare Problemstellungen für Rührprozesse untersucht. Für diese Arbeiten wurden Modellstoffsysteme entworfen, die im Brechungsindex an Acrylglas angepasst wurden. Die verwendeten Modellpartikel wiesen dabei Dichten von bis 1720 und 1850 [kg/m³] auf und die Modellfluide zeigten Newtonsches Verhalten bei 3,5 und 23,7 [mPas]. Eine detaillierte rheologische Materialcharakterisierung der Modellpartikel wurde jedoch nicht betrieben. Die zu imitierenden Fruchtzubereitungen zeigen dahingegen in der flüssigen Phase scherverdünnende Fließeigenschaften mit deutlich höheren Viskositäten und Fließgrenzen. Zusätzlich liegen die Partikeldichten zwischen 1011 und 1171 [kg/m³] und besitzen ein viskoelastisches Verhalten. Das Review von Wrigth et al. 2017 bietet einen Überblick zu einer Vielzahl von Studien zu im Brechungsindex angepassten Modellfluiden und auch Hydrogelen, von denen jedoch keine geeignet erscheinen, um die Eigenschaften der Fruchtzubereitungen abzubilden. Zur Untersuchung des Beschädigungspotentials von Fruchtstücken in Fruchtzubereitungen bei Transportprozessen in Rohrleitungen besteht daher der Bedarf an zweiphasigen Modestoffsystemen, die vergleichbare Materialeigenschaften zu den Fruchtzubereitungen aufweisen. Hierbei soll die Brechungsindexanpassung zwischen den beiden Phasen ermöglicht werden, sodass die dynamischen Phasengrenzflächen eine PIV-Messung nicht beeinflussen.

Material und Methoden

Probenmaterial: Es wurden Fruchtzubereitungen aus Erdbeeren, Kirschen und Pfirsichen untersucht. Für jede Frucht wurden vier unterschiedliche Fruchtzubereitungen von verschiedenen Herstellern bezogen. Es wurden insgesamt zehn verschiedene Proben analysiert, welche sich in ihrer Stückigkeit unterschieden. Beispielhafte Darstellungen der verschiedenen Fruchtzubereitungen sind in Abb. 1 dargestellt.



Abb. 1: Beispielhafte Abbildungen der Fruchtzubereitungen mit E1: Erdbeerzubereitung, K1: Kirschzubereitung und P1: Pfirsichzubereitung.

Gelherstellung: Zur Herstellung der Modellpartikel wurden zuerst Saccharose und NaCl in einem Becherglas eingewogen und bei Raumtemperatur in destilliertem Wasser gelöst. Anschließend wurden je nach Rezeptur die entsprechenden Mengen an κ -Carrageen, Gelatine und Johannisbrotkernmehl unter ständigem Rühren aufgelöst und für weitere 5 min gerührt. Die Hydrokolloidlösungen wurden in einem Schüttelwasserbad bei 65 ± 2 °C für 30 min erhitzt.

Nach dem Erhitzen wurden die Lösungen nochmals für eine Minute gerührt und anschließend in Glasschalen abgefüllt, abgekühlt und zur Aushärtung für 20 h in einem Kühlschrank bei 7 °C gelagert.

Versuchsplan: In einem vollfaktoriellen Versuchsplan wurden die Konzentrationen an Carrageen, Johannisbrotkernmehl und Gelatine als Faktoren gewählt. Es wurden jeweils drei verschiedene Konzentrationen der einzelnen Zutaten als Stufen gewählt. Die Konzentrationen der einzelnen Stufen können Tabelle 1 entnommen werden. Die Gele wurden im Verlauf des Versuchsplans rheologisch vermessen.

Tabelle 1: Verwendete Stufen und zugehörige Hydrokolloidkonzentrationen der im Versuchsplan vermessenen Modellgele. c_{κ} : Konzentration des κ -Carrageens, c_{J} : Konzentration des Johannisbrotkernmehls, c_{J} : Konzentration der Gelatine.

Stufe		1 (-)	2()	3 (+)
C_K	[%]	0,75	1	1,25
C _J	[%]	0	0,25	0,5
C _G	[%]	0	2	4

Rheologische Messungen: Die rheologischen Messungen wurden mit einem MCR 102 Rheometer (Anton Paar GmbH, Graz, Österreich) durchgeführt. Für die Oszillationsmessungen der Fruchtstücke sowie der Gele wurde ein Platte-Platte Messkörper des Typs PP08 (Anton Paar GmbH, Graz, Österreich) verwendet. Für die Messung wurden scheibenförmige Präparate mit einer Dicke von 2 mm hergestellt. Diese wurden mit der flüssigen Phase der Fruchtzubereitungen benetzt, um ein Austrocknen zu vermeiden. Die Messungen erfolgten im Amplitudentest bei einer Frequenz von $\omega = 10 rad/s$ bei einer logarithmischen Steigerung der Deformationsamplitude γ in 25 Messpunkten von 0,01% bis 20 %. Daraus wurden das Speicher- (G') und das Verlustmodul (G'') im linear-viskoelastischen Bereich (LVEB), der Verlustfaktor ($tan(\delta)$) und der Fließübergangsindex (τ_f/τ_{γ}) als Qualitätsparameter untersucht.

Zur Untersuchung des Fließverhaltens der Fluide wurde eine CP50-1 Kegel-Platte Messgeometrie genutzt. Die Fließgrenzen wurden dann ebenfalls im Amplitudentest bei einer Frequenz von $\omega = 10 \ rad/s$ jedoch mit einer Deformationsamplitude von 0,01 bis 100 % bestimmt. Zusätzlich wurden Fließkurven der Proben aus vier Messabschnitten aufgenommen. Diese vier Messabschnitte bestanden aus einer Vorscherphase (Scherung für 60 s bei einer Scherrate von $\dot{\gamma} = 0.1 \ s^{-1}$), einer Aufwärtsrampe ($\dot{\gamma} = 0.1 \ bis \ 100 \ s^{-1}$), einer Haltephase ($60 \ s \ \dot{\gamma} = 100 \ s^{-1}$) sowie einer Abwärtsrampe ($\dot{\gamma} = 100 \ bis \ 0.1 \ s^{-1}$). Die Messdaten wurden genutzt um mittels der Methode der kleinsten Quadrate die Parameter der Herschel-Bulkley-Modellfunktion (1) zu berechnen.

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_0 + \mathbf{k} \cdot \dot{\gamma}^n \tag{1}$$

Hierbei beschreibt τ [Pa] die Schubspannung, τ_0 [Pa] die aus dem Amplitudentest ermittelte Fließgrenze, k [Pa·sⁿ] den Fließkoeffizienten, $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] die Scherrate und n den Fließindex [Herschel und Bulkley 1926, Mezger 2016]

Brechungsindexmessung: Die Brechungsindexmessung erfolgte mit einem Abbe-Refraktometer des Typs AR4 (A.KRÜSS Optronic GmbH, Hamburg, Deutschland). Das Refraktometer wurde mit einem Wasserbad E 100 (LAUDA DR. R. WOBSER GMBH & CO. KG, Lauda-Königshofen, Deutschland) auf 25 °C temperiert und mit einer 525 nm Grünlicht-LED LED525L (Thorlabs GmbH, Bergirchen, Deutschland) ausgestattet. Zur Messung der Gele wurden dünne Scheiben mit einer Dicke von 1 bis 2 mm vermessen, wobei die Scheiben zunächst abgetupft wurden. Die Messung wurde ohne Kontaktflüssigkeit durchgeführt.

Dichtebestimmung: Die Dichtebestimmung der Flüssigkeiten wurde in einem DMA 4500 M Biegeschwinger (Anton Paar GmbH, Graz, Österreich) durchgeführt. Hierfür wurden die Phasen der Fruchtzubereitungen mit einem 1 mm Siebboden getrennt. Anschließend wurden Luftblasen sowie kleine dispergierte Partikel durch fünfminütige Zentrifugation bei 5000 g abgetrennt.

Für die Dichtebestimmung der Fruchtstücke bzw. der Gele wurde die Verdrängungsmethode genutzt. Hierfür wurden die Fruchtstücke zunächst vorsichtig gewaschen. Anschließend wurden 50 ml Wasser in einem 100 ml Messkolben vorgelegt und mit einer Analysenwaage (Sartorius AG, Göttingen, Deutschland) ausgewogen. Daraufhin wurden 50 g der Partikel eingewogen und das von den Partikeln verdrängte Volumen bestimmt.

Herstellung der Modellfluide: Um die Modellfluide herzustellen, wurden zunächst separat eine CMC- und eine Laponite®-Lösung angesetzt. Zur Herstellung der CMC-Lösung wurde destilliertes Wasser auf 60 °C temperiert und das CMC unter ständigem Rühren hinzugegeben und gelöst. Anschließend wurde die CMC-Lösung für 24 h im Kühlschrank gelagert, sodass eine vollständige Hydrierung der CMC gewährleistet werden konnte.

Zur Herstellung der Laponite®-Lösung wurde Laponite bei Raumtemperatur in destilliertem Wasser gelöst. Die CMC-Laponite®-Lösungen wurden durch Verschneiden der beiden einzelnen Lösungen und anschließende Zugabe der Saccharose hergestellt. Zur abschließenden Entgasung wurden die Mischungen mit 2500g bei einer Temperatur von 20 °C für 5 min in 50 ml Greiner Röhrchen zentrifugiert.

Ergebnisse und Diskussion

Modellpartikel: Die rheologischen Messungen beider Durchläufe des Versuchsplans sind in Abb. 2 dargestellt. Es ist zu sehen, dass vor allem bei den Werten für G' deutliche Unterschiede bei den Hydrokolloidgelen gemessen wurden. Hierbei konnten Speichermodule von 9740,49 [Pa] bis zu 22513 [Pa] erreicht werden. Die Unterschiede in den Werten für G" sind nur geringfügig ausgeprägt. Es wurden Werte zwischen 1083,66 [Pa] und 3379.63 [Pa] gemessen. Die Messwerte für $tan(\delta)$ konnten durch die unterschiedlichen Rezepturen nur geringfügig beeinflusst werden. Die Messwerte reichen von 0,1072 bis zu 0,1371. Die Fließgrenzen wurden zwischen 128,96 [Pa] und 335,26 [Pa] ermittelt. Bei den Fließübergangsindizes wurden Minimalwerte 2,40 und Maximalwerte von 4,52 erreicht. Im Vergleich hierzu wurden bei den Fruchtproben (Abb.3) für G', Werte von bis zu 28480 [Pa] gemessen. Hierzu muss jedoch erwähnt werden, dass große Standardabweichungen vorliegen, was auch für die anderen Kirschproben zutrifft. Dies ist durch Konsistenz und Form der Kirschproben zu begründen. Es kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass die Messwerte für Kirschproben beispielsweise durch die Schale (Exokarp) beeinflusst wurden. Die Herstellung von Modellpartikeln für Kirschproben wurde deshalb nicht weiter verfolgt. Die Erdbeer- und Pfirsichproben zeigten Speichermodule von 10571,6 [Pa] bis 16292,5 [Pa] was im Bereich der Gelrezepturen liegt. Die Verlustmodule lagen bei den Früchten deutlich höher und erreichten Werte zwischen 3033,12 [Pa] und 3800,8 [Pa]. Dies konnte mit den verwendeten Rezepturen nicht erreicht werden. Daher ist davon auszugehen, dass in den Hydrokolloid Gelen weniger Energie bei Belastung dissipiert und somit innerhalb der Fruchtstücke höhere Relativbewegungen auftreten. Damit einhergehend nehmen die Verlustfaktoren der Fruchtstücke auch höhere Werte an (0,213 bis 0,289). Die Fließgrenzen, und somit die Schubspannungen, an denen ein



Materialversagen eintritt, lagen zwischen 199,74 [Pa] und 365 [Pa] und können somit ebenfalls durch die Modellpartikel imitiert werden.

Abb. 2: Messwerte des Faktorenversuchsplans im Vergleich zu einem Pfirsich-Modell-Gel. Oben links: G' und G" im LVEB, oben rechts: tan(δ), unten links: Fließ- (τ_f) und Nachgebegrenze (τ_y), unten rechts: Fließübergangsindizes (τ_f/τ_y). Die Messungen wurden bei 20 °C mit einem PP08 Platte-Platte Messkörper durchgeführt. K) κ -Carrageen, J) Johannisbrotkernmehl, G) Gelatine, +) hohe Stufe, -) niedrige Stufe, ohne) mittlere Stufe.

Bei den Fließübergangsindizes weißen die Früchte mit Werten von 4,41 bis 7,13 jedoch deutlich höhere Werte auf.

Für die Erstellung eines pfirsichähnlichen Modellgels (P Modell Abb.2 und Abb.3) wurde das mittels ANOVA gewonnene Modell zur Vorhersage der Speichermodule (F=44,34, p<10⁻⁴) herangezogen. Aus Abb. 3 kann entnommen werden, dass mit G'=13830,94 [Pa] die Speichermodule gut abgebildet werden konnten. Das gemessene Verlustmodul, der Verlustfaktor sowie der Fließindex liegen jedoch unter denen der Pfirsichproben. Die Fließgrenze entspricht wiederum der der Früchte. Weitere Analysen sollen nun untersuchen, ob die Verwendung anderer Salze, kürzere Gelierungszeiten oder geringere Gelierungstemperaturen eine bessere Imitation aller Qualitätsparameter bewirken können. Die Untersuchung erdbeerähnlicher Modellpartikel ist Bestand der aktuellen Forschungsarbeiten. Ebenfalls steht der Vergleich zu bereits durchgeführten Materialcharakterisierungen der Fruchtstücke in uniaxialen Kompressionstests aus.



Abb. 3: Messwerte der Fruchtzubereitungen im Vergleich zu einem Pfirsich-Modell-Gel. Oben links: G' und G'' im LVEB, oben rechts: tan(δ), unten links: Fließ- (τ_f) und Nachgebegrenze (τ_y), unten rechts: Fließübergangsindizes (τ_f/τ_y). Die Messungen wurden bei 20 °C mit einem PP08 Platte-Platte Messkörper durchgeführt. E) Erdbeer, K) Kirsche, P) Pfirsich, P Modell) Pfirsich Modellgel mit 1 % NaCl, 0,9439 % κ -Carrageen, 0,0034 % Johannisbrotkernmehl und 20,5 % Saccharose.

Modellfluide: Die rheologischen Messungen der Modellfluide zeigten, dass durch die Verwendung der CMC-Lösungen pseudoplastische Fluide hergestellt werden konnten. Diese wiesen jedoch keine Fließgrenze auf und können somit als Ostwald/de Waele-Fluide beschrieben werden. Außerdem zeichneten sie sich durch geringe Fließindizes im Vergleich zu den vermessenen Fruchtzubereitungen aus. Die reinen Laponite®-Lösungen zeigten Fließgrenzen, verhielten sich jedoch stark scherverdünnend. Durch Verschneiden der 2 %igen CMC Lösung mit einer 1 %igen Laponite®-Lösung in verschiedenen Mischungsverhältnissen, und anschließender Einstellung einer 23 %igen Saccharose Konzentration konnten Rezepturen hergestellt werden, die in Ihrem Fließverhalten Hershel-Bulkley-Fluiden entsprechen. Die zugehörigen Fits sind in Abb 4 dargestellt. Hierbei wurden die Fließkurven der potenziellen Modellfluide mit der einer Pfirsichzubereitung verglichen. Es ist zu sehen, dass die Pfirsichprobe in der Rücklaufkurve dem Fließverhalten der Probe CMC & Lap 3/2 entspricht.

Durch die Einstellung des Saccharosegehalts konnte dabei der Brechungsindex auf einen Wert von 1,370 bei einer Wellenlänge von 525 nm eingestellt werden, welcher dem Brechungsindex des Modellgels zur Pfirsichprobe entspricht. Wie Abb. 5 zeigt, konnte somit eine Lichtbrechung an den Phasengrenzen zwischen den Modellpartikeln und Modellfluid vermieden werden, wodurch das Partikel bei Betrachtung unsichtbar erscheint. Das Partikel ist auf der Abbildung nur noch durch die eingeschlossenen Luftblasen erkennbar. In weiteren Untersuchungen wird angestrebt, den Einschluss von Luftblasen auszuschließen und völlig homogene Modellpartikel zu erzeugen.



Abb. 4: Vergleich der Pfrisichprobe P3 mit Fits der Rücklaufkurven verschiedener Mischungsverhältnisse aus 2 %iger CMC-Lösung und 1 %iger Laponite (Lap) Lösung. Die Mischungen wurden nach dem Verschneiden auf eine Saccharosekonzentration von 23 % eingestellt. Die Messungen wurden jeweils bei 20 °C durchgeführt.



Abb. 5: Vergleich zweier Gele mit angepasstem und nicht angepasstem Brechungsindex. Links: Probe ohne angepasstem Brechungsindex (2 % CMC); Rechts: Probe mit angepasstem Brechungsindex, Modellfluid CMC & Lap 3/2 aus Abb. 4 (0,385 % Laponite®, 0,77 % CMC, 23 % Saccharose).



Abb. 6: Trübung einer Modelllösung nach dem Partikelkontakt in Abhängigkeit der Kontaktzeit. Modelllösung: 2 % CMC, 1 % Laponite® (im Verhältnis von 3/2 verschnitten), Saccharosegehalt 23 %.

Abb. 7: Foto zweier Modelllösungen vor und nach dem Partikelkontakt. Links: vor Partikelkontakt; Rechts: nach Partikelkontakt.

Bei der Entwicklung der Modellfluide musste darauf geachtet werden, dass diese eine geringe Trübung aufweisen. Durch Mischungen aus Carboxymethylzellulose (CMC) und Laponite® konnte dies realisiert werden. Jedoch hat sich gezeigt, dass die Anwesenheit von Ionen in Lösungen mit Laponite® Trübungen verursachte. Da bei vielen Hydrokolloiden für die Netz-werkbildung und somit auch die Gelierung die Anwesenheit von Ionen notwendig ist, musste diese Problematik ebenfalls untersucht werden.

Daher wurde der Einfluss des Salzes auf die Trübung der Modellfluide untersucht. Hierzu wurden die Modellfluide mit den Modelpartikeln bei einem Partikelgehalt von 60 %(w/w) vermengt und der zeitliche Verlauf der Trübungsänderung betrachtet. Dabei ist zu erkennen, dass die Trübung der Fluide innerhalb von 3 h von 5,745 NTU auf bis zu 21,05 NTU ansteigt. Rouzes et al. 2014 berichten von PIV-Messungen in Abwasser bei Trübungen bis zu 35 NTU. In weiterführenden Untersuchungen ist zu prüfen, ob die hier vorgestellten Modellstoffsysteme für eine PIV Messung geeignet sind. Die Erfahrungen der bisherigen Untersuchungen lassen vermuten, dass eine Senkung der Trübung durch die Zugabe der Saccharose möglich ist. Detaillierte Betrachtungen hierzu stehen zum bisherigen Zeitpunkt noch aus und sind Gegenstand weiterer Arbeiten. Weiterhin sollen in den zukünftigen Arbeiten weitere Modelllösungen entstehen, die die Eigenschaften der Erdbeer- und Kirschproben ebenfalls abbilden. Die Modellösungen sollen ebenfalls in PIV und ggf. PTV Messungen verwendet werden, um die Anwendbarkeit bei realen Bedingungen zu prüfen.

Danksagung

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 Gemeinschtsforschung (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.

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.

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

Mezger,T., 2016: Das Rheologie Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern: Vincentz Network, 2016.

Michel, C, 2012: Wo sind die Früchte im Aprikosenjoghurt?, SRF, 2012.

Rouzes, M., Moulin, F. und Eiff, O., 2014: Stereoscopic PIV Measuremments In Turbid Waters On Natural Beds, 3rd IAHR Europe Congress, Book of Proceedings, 2014, Porto - Portugal. ISBN 978-989-96479-2-3

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. und 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. und 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.

Wright, S. F., Zadrazil, I. und Markides, C. N., 2017: "A review of solid–fluid selection options for optical-based measurements in single-phase liquid, two-phase liquid–liquid and multiphase solid–liquid flows", Exp Fluids, vol. 58, no. 9, pp. 1–39, 2017, doi: 10.1007/s00348-017-2386-y.