

## CFD Modellierung der Flüssigkeitsdrainage in Schäumen nicht-karbonisierter Getränke mittels eines Euler-Euler Ansatzes

### CFD Modelling of Liquid Drainage in Foams of Non-Carbonated Beverages using the Euler-Euler Approach

**Thomas Bernstein, Christopher McHardy, Tobias Horneber, Cornelia Rauh**

Technische Universität Berlin  
Fachgebiet Lebensmittelbiotechnologie und -prozessestechnik  
Königin-Luise Str. 22  
14195 Berlin

Numerische Strömungsmechanik, iMUSIG, Drainage, Schäume  
Numerical Fluid Dynamics, iMUSIG, Drainage, Foams

#### Zusammenfassung

Bei der Verarbeitung und Abfüllung von Lebensmitteln, sowie in der technischen Produktion von Feinchemikalien ist unerwünschte Schaumbildung häufig vorzufinden. Für die Prozesstechnologie entscheidend ist dabei die entstehende Schaumhöhe, welche sich über eine dynamische Bilanz aus der Differenz zwischen Schaumbildungs- und Schaumzerfallsraten ergibt. Entscheidend für die in der Regel zeitlich variablen Zerfallsraten und damit die Stabilität von Schäumen, erweist sich die komplexe hydrodynamische Flüssigkeitsdrainage in den Lamellen. Für die Vorhersage von Schaumstabilitäten besteht somit die Notwendigkeit zur Bestimmung von Drainageraten in Abhängigkeit der physikalischen Fluideigenschaften.

Drainagegeschwindigkeiten sind stark abhängig von der Schaummorphologie, die über die Packdichte der Blasen und den vorliegenden Flüssigkeitsgehalt definiert wird. Die Strömung innerhalb der Lamellen wird dabei hauptsächlich durch Kapillar- und Gravitationskräfte getrieben. Die Anwendung von Morphologiefunktionen zur Detektion von Schäumen stellt eine mögliche Alternative zur mikroskaligen Auflösung des Schaums dar, die die Verwendung größerer Gitter innerhalb eines Euler-Euler Ansatzes und die Bestimmung der Drainageraten unter ökonomischen Rechenzeiten ermöglicht.

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Simulation der Flüssigkeitsdrainage durch die gezielte Adaption der Transportterme in den Impulsbilanzen. Ausgehend von neueren Konzepten für generalisierte Zweiphasenströmungen (GENTOP) erfolgt die Modellierung der Massen- und Impulsbilanzen innerhalb des Schaumes unter Berücksichtigung der vorherrschenden Strömungswiderstände. Die entwickelte Methode wurde in ANSYS CFX 2019R1 implementiert und der Einfluss der initialen Schaumporosität sowie -permeabilität in nicht-karbonisierten Getränken auf die vorliegenden Drainagegeschwindigkeiten numerisch bestimmt. Zur Modellvalidierung dienen analytische Lösungen in Form der Darcy Gleichung, die die Drainage innerhalb von Schäumen ähnlich zu Strömungen durch poröse Medien beschreibt.

## Einleitung

Entstehende Schäume beim zügigen Abfüllen von Säften oder anderen nicht-karbonisierten Getränke sind ein weitverbreitetes Problem für Lebensmittelproduzenten. Häufig resultiert dies bei gleichbleibender Abfüllmenge im Überschäumen des Produkts und der Kontamination von Maschinenteilen. Infolgedessen müssen Anlagen häufig gereinigt werden und wirtschaftlich relevante Stillstandszeiten entstehen. Mittels Anpassung der Fülldynamik an die Schaumfähigkeit der Produkte kann der Schaumentstehung zwar Einhalt geboten werden, Produktionsleistung und -effizienz werden dadurch jedoch ebenso beeinträchtigt. Eine Vorhersage der Schaumausdehnung unter praxisrelevanten Bedingungen ist daher von besonderem Interesse für Produzenten nicht-karbonisierter Getränke.

Grundsätzlich resultiert die örtliche Ausdehnung von Schäumen aus der Nettobilanz von Schaumentstehungs- und -zerfallsprozessen die parallel stattfinden (Pilon et al. 2001). Erheblichen Anteil an der Schaumentstehung hat der induzierte Gaseintrag in Verbindung mit der relativen Schaumkapazität des Mediums. Diese Schaumkapazität ist abhängig von der Zusammensetzung des Mediums in Bezug auf das Vorkommen oberflächenaktiver Substanzen, jedoch konnten für Schlacke, Gläser sowie Säfte entdimensionalisierte Korrelationen einzig und allein auf Basis der Stoffeigenschaften Viskosität, Dichte und Oberflächenspannung hergeleitet werden (Pilon et al. 2001; McHardy et al. 2018). Zerfallsprozesse im Schaum, finden dagegen zum einen durch natürliche Alterungsprozesse statt, oder können durch chemische, thermische und mechanische Schaumzerstörungsverfahren eingeleitet werden (Pahl und Franke 1995). Jedoch wird die Zugabe von Silikonen und anderer chemischer Substanzen zur Herabsetzung der Oberflächenspannung im Lebensmittelbereich grundsätzlich vermieden. Thermische Zerstörungsmechanismen destabilisieren Schäume stattdessen, indem die Viskosität herabgesetzt wird oder Lammellenflüssigkeit verdampft. Gleichzeitig belasten diese aber häufig das Medium und resultieren in unerwünschten sensorischen Veränderungen. Im Gegensatz dazu können mechanische Verfahren Schäume ohne Additive oder Belastung des Mediums kontrollieren. Nichtsdestotrotz können Sekundärschäume mit höherer Stabilität entstehen und weitreichende Folgen für die Fülldynamik nicht ausgeschlossen werden. Natürliche Alterungsprozesse finden dagegen vollkommen ohne äußere Einwirkung statt. In den für den Abfüllprozess relevanten Zeitskalen ( $\sim 5\text{-}20$  s) ist die gravitationsgetriebene Flüssigkeitsdrainage der dominante Prozess beim Schaumzerfall (Saint-Jalmes 2006). Infolgedessen trocknet Schaum an der Oberfläche aus, bis stabilisierende Effekte nicht mehr ausreichen bestehende Blasen aufrechtzuhalten.

Mittlerweile sind große Fortschritte gemacht worden, Modelle der komplexen Dynamiken in Mehrphasenströmungen für die numerische Strömungsmechanik zu generieren. Mit dem GENTOP Konzept ist aktuell ein Ansatz für Mehrphasenströmungen verfügbar, in denen disperse Strömungen und Strömungen mit freien Oberflächen simultan auftreten (Hänsch et al. 2012). Dieser Ansatz kann genutzt werden, um den Gaseintrag während des Abfüllvorgangs zu quantifizieren. Unter Verwendung eines inhomogenen Multiple Size Group (iMUSIG) Modells können unterschiedliche Blasengrößenklassen simuliert und mithilfe von Morphologiefunktionen die Dynamik von Blasenströmungen im Euler-Euler Ansatz gezielt angepasst und dargestellt werden. Grenzflächen zwischen Gasblasen und Flüssigkeit werden mit dieser Methode nicht direkt detektiert, sondern als Konzentrationsfeld betrachtet. Erst ab einer definierten Blasengröße wird die Grenzfläche aufgelöst, sodass die Verwendung größerer Gitter möglich ist und die Rechenzeit erheblich reduziert wird.

Dieses Prinzip soll im vorliegenden Beitrag auf Schäume erweitert werden um die vorherrschenden Strömungsregime der Phasen gezielt zu adaptieren. Dazu wird vorerst ein Drainage-Modell in Form der Non-Darcy Gleichung zur Beschreibung von Strömungen in porösen Medien implementiert. Ein isotropes Verlustmodul wird zur Impulsbilanz der kontinuierlichen

wässrigen Phase addiert, welches gezielt aktiviert wird unter Verwendung einer zusätzlichen Morphologiefunktion zur Detektion von Schaumstrukturen im Rechengebiet.

## Flüssigkeitsdrainage in Schäumen

Man unterscheidet Schäume anhand des Volumenanteils der Flüssigphase zwischen nassen Kugelschäumen und trockenen Polyederschäumen. Typischerweise sind trockene Schäume komplexe, ungeordnete Strukturen und bestehen aus dünnen Filmschichten, Lamellen genannt. Diese treffen sich in Plateaugrenzen, die wiederum zu viert in Knotenpunkten aufeinanderstoßen. Die Dicke der Plateaugrenzen, sowie die Filmschichten stehen in direktem Zusammenhang mit dem vorhandenen Volumenanteil der Flüssigphase. In trockenen Schäumen ist der Querschnitt der Plateaugrenzen besonders gering, wohingegen in nassen Schaumtopologien mit sphärischen Blasen weitaus größere Kanäle und Filmschichten vorkommen können. Innerhalb dieser Elemente findet Drainage statt, für die verschiedene Modelle zur Beschreibung der Strömung erstellt wurden. Häufig basieren diese auf den Modellvorstellungen des Darcy Gesetz, das den Druckverlust einer Strömung durch poröse Medien beschreibt (Verbist et al. 1996; Muralidhar 2018). Darin wird die mittlere Fluidgeschwindigkeit in den Kapillaren  $u$  mit dem Druckgradienten  $\Delta p$  über die Permeabilität  $K$  und Viskosität  $\mu$  in Relation gesetzt. Mittlerweile wurde festgestellt, dass mit der Carman-Kozeny Gleichung, einer komplexeren Form der Darcy Gleichung, die Drainage in einer monodispersen Blasengrößenverteilung über ein weites Spektrum, vom trockenen Schaum mit starren Grenzflächen bis hin zum nassen Schaum mit mobilen Grenzflächen, beschrieben werden kann (Rouyer et al. 2010).

Die Permeabilität charakterisiert dabei die Fähigkeit einer Flüssigkeit sich durch ein anderes Medium zu bewegen (Weaire et al. 1993). Im Gegensatz zu festen porösen Medien ist die Porengröße in Schäumen aber dynamisch an den Volumenanteil der flüssigen Phase  $\alpha_l$  gekoppelt (Saint-Jalmes 2006). Aufgrund der viskosen Dissipation in den Lamellen oder den Knotenpunkten ist die Permeabilität neben dem Flüssigkeitsgehalt im Schaum ebenfalls von Blasengrößenverteilung und Mobilität der Grenzflächen sowohl örtlich wie auch zeitlich abhängig (Weaire et al. 1993). Grundsätzlich wird angenommen, dass sich die Permeabilität mit Mobilität der Grenzflächen erhöht und somit höhere Drainageraten möglich sind (Rouyer et al. 2010; Koehler et al. 2000; Weaire et al. 1993).

## Material und Methoden

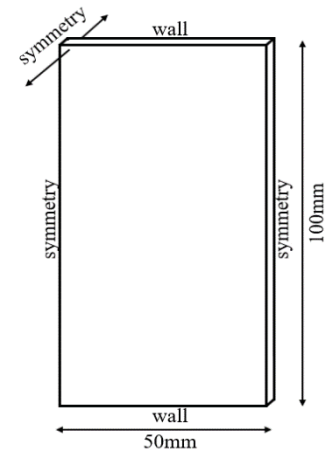
Die Drainage wurde für die kommerziell erhältliche Säfte Orange (OJ), Schwarze Johannisbeere (BC) und Rote Beete (BR), sowie für Wasser (W) simuliert. Für jede Flüssigkeit wurde die Massendichte, die Oberflächenspannung und die dynamische Viskosität in Dreifachbestimmung ermittelt. Die Dichte wurde im Biegeschwinger gemessen (Anton Paar DMA 4100M). Die dynamische Viskosität wurde im Rheometer (Anton Paar MCR 102) bei Scherraten zwischen  $\dot{\gamma} = 5 \text{ s}^{-1}$  und  $\dot{\gamma} = 250 \text{ s}^{-1}$ . Die Bestimmung der Oberflächenspannung erfolgte im Tensiometer (Krüss K11) mit der Plattenmethode. Die Materialeigenschaften der unterschiedlichen Flüssigkeiten sind zusammengefasst in Tabelle 1.

**Tab. 1:** Physikalische Parameter der untersuchten Flüssigkeiten bei 20 °C

	$\rho$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$\sigma$ [N m <sup>-1</sup> ]	$\mu$ [Pa s <sup>-1</sup> ]
OJ	1043.37	0.0409	0.00338
BC	1011.86	0.0453	0.00127
BR	1041.84	0.0411	0.00147
W	997.00	0.0730	0.00890

## Modellierung und Simulation

Transiente Simulationen der Flüssigkeitsdrainage in einem monodispersen Schaum werden mit der Software ANSYS CFX 2019R1 durchgeführt und die räumliche Diskretisierung durch ANSYS ICEM CFD 2019R1. Ausgehend von einem 10 cm hohen Schaum mit homogener Längenausdehnung in der Horizontalebene, kann die Geometrie durch Symmetriebedingungen in den zweidimensionalen Raum überführt werden (Abbildung 1). Die Ergebnisse sind auf einem äquidistanten Gitter mit 5000 Elementen mit einer Kantenlänge von 1 mm berechnet. Die Gitterunabhängigkeit der Lösung wurde überprüft und bestätigt. Zur Initialisierung der Simulationen wird die Geometrie vollständig mit Schaum gefüllt. Die kontinuierliche flüssige Phase wird für das gesamte Rechengebiet vorgelegt und zwischen  $\alpha_l=0.05-0.20$  variiert. Der Volumenanteil der Luft  $\alpha_g$  ergibt sich als  $\alpha_g=1-\alpha_l$  und wird als disperses Fluid mit homogenem Blasengrößendurchmesser zwischen  $d_g=0,5$  mm und 8 mm variiert. Die transienten Simulationen werden mit einem adaptiven Zeitschrittverfahren gerechnet. Das gesamte numerische Verfahren ist zusammengefasst in Tabelle 2.



**Abb. 1:** Ausmaße der Simulationsgeometrie mit Randbedingungen

**Tab. 2:** Zusammenfassung des numerischen Verfahrens

Advektionsschema	Option	High Resolution
Transient	Diskretisierung	Impliziter Euler 2.Ordnung
	$\Delta t$	adaptiv
	Min./Max. Zeitschritt	1e-05/1e-02 s
	Wiederholungen	5/8
	Adaptionsfaktor	0.8/1.06
Konvergenzkontrolle	Kontrolle der Zeitskala	Koeffizientenwiederholung
	Min./max. Wiederholungen	2/50
Konvergenzkriterium	Residentyp	RMS
	Zielresiduum	1e-04

Die hydrodynamische Strömung im Schaum wurde durch einen Euler-Euler Ansatz modelliert. Dabei wird die disperse Gasphase gemittelt und einzelne Blasen nicht gesondert betrachtet. Beide Phasen teilen sich im Ansatz dasselbe Druckfeld. Die Gleichung für den Massenerhalt ist gegeben durch

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k) + \nabla \cdot (\rho_k \alpha_k \vec{u}_k) = 0 \quad (1)$$

Mit  $k$  als Index für die Flüssigphase  $l$  und die Gasphase  $g$ . Die weiteren Zeichen  $\rho_k$ ,  $\alpha_k$  und  $\vec{u}_k$  stehen für die Dichte, den Volumenanteil und den Geschwindigkeitsvektor der jeweilig betrachteten Phase. Die Impulsgleichung ist gegeben durch

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k \vec{u}_k) + \vec{\nabla} \cdot (\rho_k \alpha_k \vec{u}_k \vec{u}_k) = -\alpha_k \nabla \vec{p} + \alpha_k \vec{\tau}_k + \rho_k \alpha_k \vec{g} + \vec{M}_{s,k} + \vec{S}_{Mk} \quad (2)$$

Die Terme auf der linken Seite der Gleichung sind die zeitliche und örtlichen konvektiven Beschleunigungsterme. Im vorliegenden Fall eines 10 cm hohen Schaumes können auf der rechten Seite der Stresstensor, sowie die Terme der Gravitations- und Interphasenkräfte für die kontinuierliche flüssige Phase vernachlässigt werden, sodass Gleichung (2) vereinfacht wird zu

$$\rho_l \alpha_l \left( \frac{\partial \vec{u}_l}{\partial t} + \vec{u}_l \nabla \vec{u}_l \right) = -\alpha_l \nabla \vec{p} + \alpha_l \vec{S}_{Ml} \quad (3)$$

Demnach bleiben auf der rechten Seite nur noch Druckgradient und Impulsquellterm erhalten. Der Impulsquellterm wird in der vorliegenden Arbeit durch ein isotropes Verlustmodul definiert.

$$\vec{S}_{Ml} = -\alpha_l \frac{\mu_l}{K_{\text{perm}}} \vec{u}_l \quad (4)$$

Darin beschreibt  $\mu_l$  die effektive Viskosität der flüssigen Phase und  $K$  die Permeabilität des porösen Körpers d.h. des Schaums für die Flüssigphase. Bei Strömungen durch ein poröses Medium definiert die Porosität das für die Strömung zur Verfügung stehende Volumen. Somit kann der Volumenanteil der flüssigen Phase durch die Porosität  $\epsilon$  ersetzt werden. Setzt man das Verlustmodul in Gleichung (3) ein und teilt daraufhin durch den Volumenanteil ergibt sich

$$\rho_l \left( \frac{\partial \vec{u}_l}{\partial t} + \vec{u}_l \nabla \vec{u}_l \right) = -\nabla \vec{p} - \epsilon \frac{\mu_l}{K_{\text{perm}}} \vec{u}_l \quad (5)$$

Die lokale Fluidgeschwindigkeit der flüssigen Phase  $\vec{u}_l$  kann durch den Quotienten aus Gesamtgeschwindigkeit  $\vec{u}$  und dem Volumenanteil bzw. Porosität der flüssigen Phase ersetzt werden.

$$\rho_l \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t \epsilon} + \frac{\vec{u}}{\epsilon} \nabla \frac{\vec{u}}{\epsilon} \right) = \nabla \vec{p} - \frac{\mu_l}{K_{\text{perm}}} \vec{u} \quad (6)$$

Durch ausklammern der Porosität erhält man das non-Darcy Model für Strömungen in porösen Medien ohne Berücksichtigung der Forchheimer und Brinkmann Approximation wie es von Muralidhar (2018) vorgestellt wird.

$$\frac{\rho_l}{\epsilon} \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon} \vec{u} \nabla \vec{u} \right) = \nabla \vec{p} + \frac{\mu_l}{K_{\text{perm}}} \vec{u} \quad (7)$$

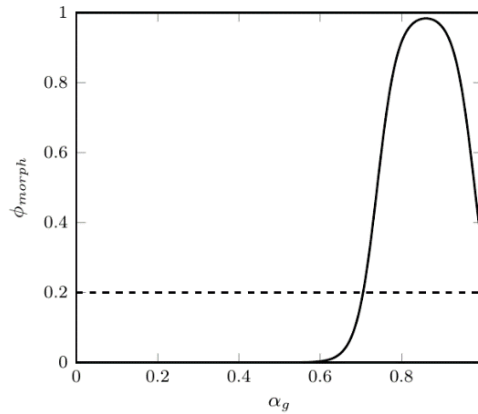
Der Permeabilitätskoeffizient in dieser Gleichung kann durch unterschiedliche Modelle in Abhängigkeit der Schaummorphologie approximiert werden (Weaire et al. 1993; Koehler et al. 2000). In der vorliegenden Arbeit wird ein Permeabilitätsfaktor für monodisperse Schäume mit geringem Flüssigkeitsgehalt und starren Grenzflächen angenommen (Rouyer et al. 2010). Dabei sind viskose Verluste vor allem in den Plateaugrenzen zu erwarten und weniger in den Knoten des Schaumes. Dieser ist gegeben durch

$$K_{\text{perm}} \begin{cases} 8 \cdot 10^{-4} \cdot d_g^2 \cdot \alpha_l^2 & \text{wenn } \varphi_{\text{morph}} \geq 0.2 \\ 1\text{m}^2 & \text{wenn } \varphi_{\text{morph}} < 0.2 \end{cases} \quad (8)$$

Darin beschreibt  $d_g$  den Blasendurchmesser der Gasphase und  $\epsilon$  die Porosität des Schaums, also den Volumenanteil  $\alpha_l$  der flüssigen Phase. Um in Zukunft das Verlustmodul in komplexeren Mehrphasenströmungen im Euler-Euler Ansatz nur bei auftretenden Schäumen zu aktivieren, wird die Permeabilität anhand der Morphologiefunktion  $\varphi_{\text{foam}}$  angepasst. Diese Funktion detektiert Schaumstrukturen in der Berechnungsdomäne anhand der vorliegenden Gasvolumenanteile in Anlehnung an das GENTOP Konzept durch

$$\varphi_{\text{foam}} = (0.5 \tanh(a_b \cdot [\alpha_g - \alpha_{g,\text{foam min}}]) + 0.5) - (0.5 \tanh(a_b \cdot [\alpha_g - \alpha_{g,\text{foam max}}]) + 0.5). \quad (9)$$

Der minimale Gasvolumenanteil im Schaum ist hier durch die dichteste Kugelpackung  $\alpha_{g,\text{foam min}}=0.74$  gegeben, der maximale mit  $\alpha_{g,\text{foam max}}=0.98$  und ein Übergangskoeffizienten von  $a_b=20$ . Die Morphologiefunktion ist dargestellt in Abbildung 2. Außerhalb der detektierten Schaumstrukturen bei  $\varphi_{\text{foam}} < 0.2$  wird durch eine hohe Permeabilität das Verlustmodul deaktiviert und eine freie Strömung für die Flüssigphase ermöglicht.



**Abb. 2:** Morphologiefunktion zur Detektion von Schaum im Euler-Euler Ansatz

### Postprocessing

Der Drainagefluss wird durch eine Mittelung der Fluidgeschwindigkeit auf einer Ebene 20 mm über der unteren Grenze des Rechengebiets ausgewertet. Die flächenbezogene Drainage wird berechnet durch den vorliegenden Massenstrom über die Ebene mit

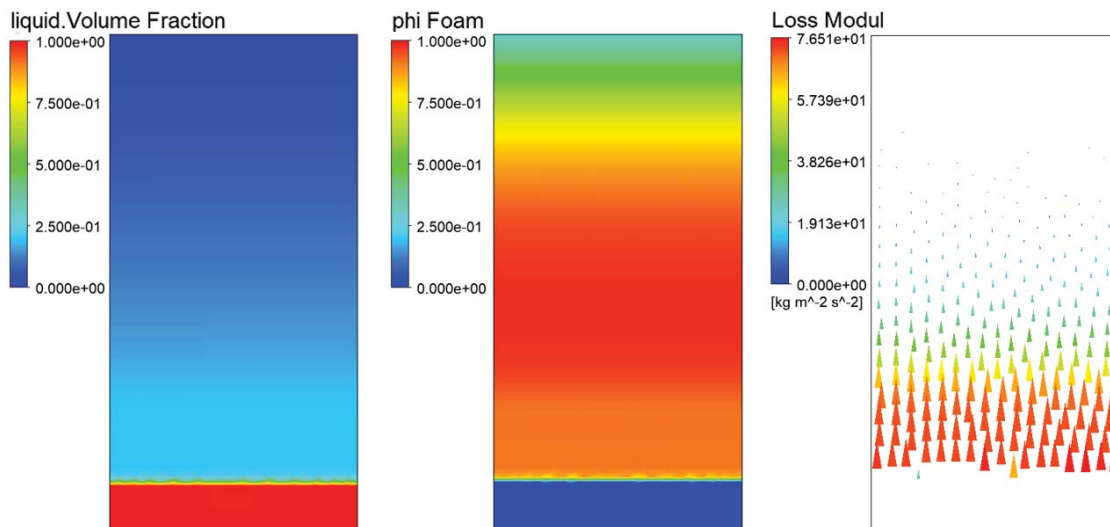
$$\frac{\dot{m}}{A} = u_l \cdot \rho_l \cdot \alpha_l \quad (10)$$

Diese Drainagerate pro Flächeneinheit wird mit der non-Darcy Formulierung (Gleichung 7) als analytische Lösung verglichen. Dabei wird angenommen, dass eine stationäre Strömung vorliegt, bei dem die durch Drainage abfließende Flüssigkeit an der Schaumoberfläche zur Befeuchtung wieder zugeführt wird. Dadurch sollte sich für die Flüssigkeit eine konstante Geschwindigkeit in Richtung der Gravitation einstellen. Die analytische Lösung für die Fluidgeschwindigkeit der non-Darcy Gleichung ist dann gegeben durch

$$-u_l = \frac{\rho_l \cdot g \cdot K_{perm} \cdot \epsilon}{\mu_l} \quad (11)$$

### Ergebnisse und Diskussion

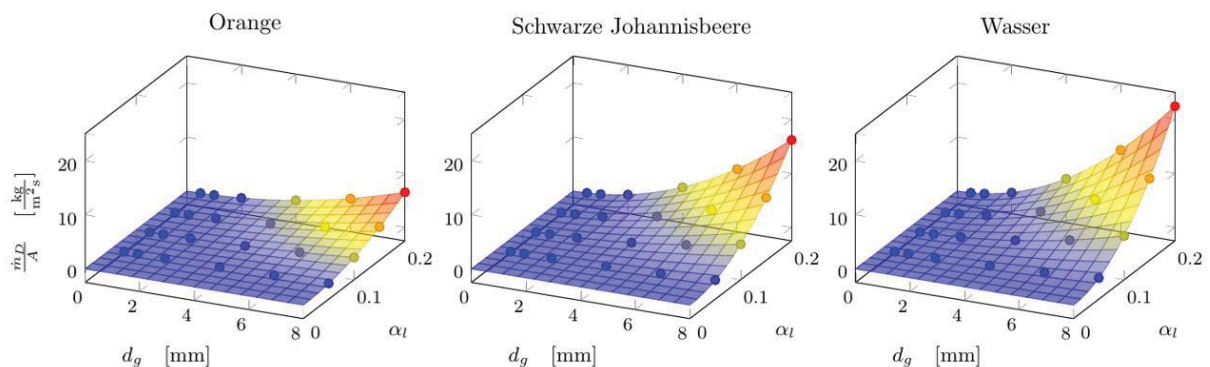
Die gezielte Aktivierung des isotropen Verlustmoduls für die kontinuierliche Schaumphase konnte erfolgreich umgesetzt werden (Abbildung 3).



**Abb. 3:** Contourplots für den Volumenanteil der Flüssigphase (links), die Detektion der Schaummorphologie (mittig) und das Vektorfeld des Verlustmoduls (rechts) nach 0,5 Sekunden für BC bei  $d_g=8\text{mm}$  und  $\alpha_l=0,20$ .

An der unteren Grenze des Rechengebiets hat sich nach 0,5 s bereits ein Flüssigkeitsreservoir gebildet. Die Morphologiefunktion ergibt in diesem Bereich  $\varphi_{\text{foam}}=0$  und detektiert wie geplant keinen Schaum. Über diesem Reservoir werden dagegen anhand der Gaskonzentration  $\alpha_g > \alpha_{g,\text{foam min}}$  Schaumstrukturen erkannt und das Verlustmodul wirkt auf die kontinuierliche Phase. Eine ungebremschte Beschleunigung der flüssigen Phase aufgrund der Gravitation ist hier nicht mehr möglich.

Die simulierten sowie analytischen Lösungen für die vorliegenden Drainageraten sind in Abbildung 4 für drei Flüssigkeiten aufgetragen. Die Simulationen konnten die analytische Lösung der Drainagerate für alle untersuchten Flüssigkeiten zum Großteil sehr gut nachstellen. Der gemittelte relative Fehler für alle Medien ist mit  $\epsilon_{\text{OJ}}=0,09\%$ ,  $\epsilon_{\text{BC}}=1,45\%$ ,  $\epsilon_{\text{BR}}=4,45\%$  und  $\epsilon_{\text{W}}=0,15\%$ . Es ist zu erwarten, dass der doch verhältnismäßig große Fehler bei Rote Beete Saft durch eine Reduktion des Zielresiduums von  $1\text{e-}04$  auf  $1\text{e-}06$  oder eine Verfeinerung des Gitters verringert werden kann.



**Abb. 4:** Surface-Plots der zu erwartenden stationären Drainagerate für Schäume verschiedener Flüssigkeiten in Abhängigkeit der Blasengröße und des Volumenanteils der flüssigen Phase nach der non-Darcy Gleichung. Die Punkte in den Diagrammen zeigen die Ergebnisse der Simulationen zwischen  $d_g=0,5\text{-}8$  mm und  $\alpha_l=0,05\text{-}0,2$ .

Wie erwartet erhöht sich mit Blasengröße und Volumenanteil der kontinuierlichen Phase dessen Mobilität durch eine Steigerung der Permeabilität. Dabei soll erwähnt werden, dass Blasendurchmesser von  $d > 4$  mm bei Säften kaum auftreten (McHardy et al. 2018). Vergleicht man das Ausmaß der Drainage zwischen den unterschiedlichen Flüssigkeiten wird erkenntlich, dass unter den physikalischen Parametern die Viskosität den größten Einfluss auf die Strömung ausübt.

## Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Vorgehen kann die Drainagerate für den stationären Fall von monodispersen Schäumen im Euler-Euler Ansatz berechnet werden. Die gezielte Anpassung der Impulsbilanz zur Darstellung von schaumspezifischem Fließverhalten durch die Implementierung einer Morphologiefunktion konnte erfolgreich umgesetzt werden. In Zukunft bietet dieses Vorgehen in Kombination mit dem GENTOP Konzept die Möglichkeit Mehrphasenströmungen in unterschiedlichen Regimes in einem Modell zu berechnen.

Entscheidend für eine erfolgreiche Simulation des Schaumzerfalls für industrielle Prozesse ist aber eine Berücksichtigung der lokalen und zeitlichen Änderung der Blasengröße und -form, sowie deren Einfluss auf die Drainagerate im Modell. Dadurch sollte z.B. das Verlustmodul an der Schaumoberfläche erheblich stärker wirken und ein trockener Schaum ermöglicht werden. Um die Schaumbilanz zu komplettieren müssen der Drainage zum einen noch Kapillarkräfte an der Grenzfläche zwischen Schaum und Flüssigkeitsreservoir entgegengesetzt werden, sodass die Entstehung von stabilem Schaum simuliert werden kann. Zum anderen muss eine

Vergrößerung der Schaumstruktur durch diffusiven Gastransfer zwischen den Blasenklassen modelliert werden und gegebenenfalls Koaleszenzen mitberücksichtigt werden.

Dadurch soll der Abfüllprozess und dessen Strömungsdynamik zukünftig in ihrer Gesamtheit erfasst werden und Einflüsse der Flaschen- und Füllrohrgeometrie auf den Gaseintrag und die resultierende Schaumbildung prognostiziert werden. Eine Anwendung des Modells auf thermische Trennprozesse mit schäumenden Medien in Destillations- und Rektifikationskolonnen ist prinzipiell denkbar, das Modell muss dann aber durch Energiegleichungen zur Darstellung thermischer Effekte ergänzt und Stoffgrößen temperaturabhängig definiert werden. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse soll damit die Schaumentstehung im Rahmen der Prozessparameter unter gleichbleibender Effizienz so weit wie möglich minimiert werden.

Zukünftig wird geplant ein Multiskalenmodell zu entwickeln, indem Transportprozesse direkt auf der mikroskaligen Ebene des Schaums, also in einzelnen Lamellen, Plateaugrenzen und Knoten simuliert werden. Dadurch sollen gezielt Modelle generiert werden, die für das vorliegende makroskalige Modell z.B. die Permeabilität in Abhängigkeit der vorliegenden Schaumtopologie vorgeben.

## Dankesworte

Wir bedanken uns für die Finanzierung unserer Forschung durch das Programm zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über den Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI, Bonn) im Rahmen der IGF-Vorhaben AiF 19711N und dem DFG/AiF-Cluster 6 - TP 6 (AiF 3 PN). Vielen Dank auch an Karolina Fidos für die Messungen der physikalischen Parameter der Flüssigkeiten.

## Literaturverzeichnis

**Koehler, S. A., Hilgenfeldt, S., Stone, Howard A., 2000:** "A Generalized View of Foam Drainage: Experiment and Theory" *Langmuir* Vol. 16, No.15, pp. 6327–6341.

**McHardy, C., Rudolph, A., Panckow, R., Kostova, J., Wegener, M., Rauh, C., 2018:** "Morphological Characterization of Foams during the Filling of Non-Carbonated Beverages" *GALA e.V.*, pp. 46.1-46.8.

**Muralidhar, K., 2018:** "Equations Governing Flow and Transport in Porous Media" *Modeling Transport Phenomena in Porous Media with Applications*, pp. 15–63.

**Pahl, M. H., Franke, D., 1995:** "Schaum und Schaumzerstörung - ein Überblick" *Chemie Ingenieur Technik* Vol. 67, No. 3, pp. 300–312.

**Pilon, L., Fedorov, A. G., Viskanta, R., 2001:** Steady-State Thickness of Liquid–Gas Foams. In: *Journal of Colloid and Interface Science* Vol. 242 No. 2, S. 425–436.

**Rouyer, F., Pitois, O., Lorenceau, E., Louvet, N., 2010:** "Permeability of a bubble assembly: From the very dry to the wet limit" *Physics of Fluids* Vol. 22, No.4, S. 43302.

**Saint-Jalmes, A., 2006:** "Physical chemistry in foam drainage and coarsening" *Soft Matter* Vol. 2, No.10, pp. 836

**Verbist, G., Weaire, D., Kraynik, A. M., 1996:** "The foam drainage equation" *J. Phys.: Condens. Matter* Vol. 8, No. 21, pp. 3715–3731.

**Weaire, D., Pittet, N., Hutzler, S., Pardal, D., 1993:** "Steady-state drainage of an aqueous foam" *Physical review letters* Vol. 71, No. 16, pp. 2670–2673.