

Physikalisch basiertes Management störender Schäume in Produktionsanlagen: Prävention, Inhibierung und Zerstörung (DFG/AiF-Cluster)



Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Bonn
Laufzeit:	2018 – 2021
Zuwendungssumme:	€ 3.013.358,-- (Förderung durch BMWK via AiF/FEI im Rahmen der IGF-Fördervariante PLUS sowie durch DFG)

Ausgangssituation

Bei der technischen Produktion von Lebensmitteln und Getränken sowie Feinchemikalien kommt es häufig zu einer unerwünschten Schaumbildung, die zu wesentlichen Änderungen von Massen-, Impuls- und Energietransporteffekten sowie zur (bio)chemischen Umsetzung – bis hin zur vollständigen Behinderung der Prozessierung – führen kann. Betroffen sind Kolonnen und Wäscher in der chemischen Industrie ebenso wie Maische- und Fermentationsbehälter, Rührapparate, Brennblasen und Verstärkerkolonnen in der Lebensmittelproduktion.

Die unerwünschte Schaumbildung verursacht in Rektifikationskolonnen hohe Druckverluste, verringerte Durchsätze und eine reduzierte Trennleistung durch Rückvermischung; die finanziellen Folgen dieses Phänomens sind insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) groß. Die bisherige Behandlung des Problems erfolgt in der Praxis derzeit nur mittels hoher Sicherheitszuschläge, aufwändiger Trial-and-error-Versuche in Pilotanlagen oder durch den Einsatz chemischer Entschäumungsmittel.

Ziel des PLUS-Vorhabens war es, aufbauend auf den Ergebnissen des DFG/AiF-Clustervorhabens „[Simulation von Proteinschäumen](#)“ (DFG/AiF-Cluster 5) in einem multidisziplinären Ansatz physikalisch basierte Maßnahmen zu erarbeiten, die zur Prävention, Inhibierung und Zerstörung von Schäumen eingesetzt werden können. Im Vordergrund sollte hierbei u.a. die Entwicklung eines leicht bedienbaren informationstechnologischen Prognosewerkzeugs stehen, um kleinen und mittelständischen Unternehmen zu helfen, unter Berücksichtigung stofflicher Varianzen durch bloße Eingabe leicht bestimmbarer Stoff- und Prozessdaten die Gefahr der Entstehung unerwünschten Schaums in ihren Produktionsanlagen abzuschätzen bzw. bei weitgehendem Verzicht auf den Einsatz chemischer Entschäumungsmittel Prozessstabilität in diesen Anlagen zu erreichen.

Das Cluster bestand aus folgenden zeitlich parallel bearbeiteten Teilprojekten (TP)

TP 1 (DFG 40 806 2554)

Systematische Studien zur Schaumprävention und -inhibierung durch Identifikation von Grenzflächen-Nichtexistenz-Domänen und ihre Realisierung mittels adaptiver Gestaltung von Kolonnenfüllkörpern und -packungen

Universität Erlangen-Nürnberg
Department Chemie- und Bioingenieurwesen
Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Prof. Dr. Antonio Delgado

Ziel von Teilprojekt 1 (DFG 40 806 2554) war es, Domänen zu identifizieren, in welchen die zur Schaumbildung notwendigen statischen und/oder thermofluidodynamischen Verhältnisse nicht existieren.

Forschungsergebnis

Im Fokus des Vorhabens standen zunächst die Schaumprävention und die Schauminhibierung in gepackten Kolonnen durch systematische Untersuchungen der Stabilität fluiddynamischer Prozesse in vereinfachten Kanälen. Dies ermöglichte es, analytische Lösungen für das statische und dynamische Kapillarverhalten des flüssig-gasförmigen Systems zu finden, die bisher in der Literatur fehlten. Ein Störungsansatz lieferte Aussagen darüber, wie sich die Stabilität der Grenzfläche gegenüber dem mechanischen Einschluss von Gas und somit gegenüber der Blasen- und Schaumbildung erhöhen lässt.

Die gewonnenen Erkenntnisse dienten der Entwicklung neuer Kolonneneinbauten zur Schaumprävention und -inhibition. Zusätzlich zu der kapillarmechanisch optimierten Kanalstruktur haben sich Zentrifugalkräfte als besonders effizient für das physikalische Schaummanagement erwiesen zur passiven Prävention und Inhibierung unerwünschten Schaums. Erstmals in der Literatur erfolgte die Induktion der Zentrifugalkräfte mit helikalen Außengeometrien, welche von einem Zylinder umschlossen werden. Die Geometrien unterscheiden sich durch Außendurchmesser, Ganghöhe, spezifische Oberfläche und Öffnungswinkel zwischen Helix und Kanal. Unterschiedliche Ausführungen wurden bei Flüssigkeitsbelastungen von $25 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ und $50 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ einer schäumenden Natriumcaprylatlösung und Gasbelastungen bis zu einem F-Faktor von 4 experimentell und numerisch auf ihren Druckverlust, ihre Schaumstabilität und ihre spezifische Stoffaustauschfläche untersucht. Die experimentellen und numerischen Untersuchungen zeigten in Bezug auf den Druckverlust eine gute Übereinstimmung, aber Abweichungen im Übergangsverhalten vom stabilen in den instabilen Fließzustand. Durch die grundlegende Kontrolle des Oberflächenverhaltens liegen nun gesicherte Auslegungsrichtlinien für eine optimierte Geometrie vor. Die neuartigen Packungseinbauten wurden mit einer industriell weit verbreiteten strukturierten Packung verglichen. Dabei zeigte die neuartige Packungsgeometrie einen vergleichbaren Druckabfall und eine geringere spezifische Stoffaustauschfläche bei einer jedoch deutlich höheren Stabilität gegenüber hohen Gasbelastungen und Schaum.

Publikationen (Auswahl)

1. FEI-Dokumentation des Web-Abschluss Symposiums zum DFG/AiF-Clustervorhaben (IGF-Plus) „Physikalisch basiertes Management störender Schäume in Produktionsanlagen: Prävention, Inhibierung und Zerstörung“ am 1.3.2022, www.fei-bonn.de/veranstaltungen-termine/cluster-symposien/abschluss-symposium-cluster-2022-03-01 (2022).
2. Osorio Nesme, A. et al.: Helical packing columns for preventing foam formation: Experimental and numerical investigations. Chem. Eng. Technol. 45 (8), 1404-1413 (2022).
3. Topic, N., Hohagen, H., Almazán-Torres, L., Osorio Nesme, A. & Delgado, A.: Prevention and Inhibition of Foam in Packed Columns: Interface Stability and Flow Properties. Proc. 28. GALA-Tag. „Experimentelle

- Strömungsmechanik", 7.-9.9.2021, Bremen (Fischer, A., Stöbener, D., Vanselow, C., Ruck, B. & Leder, A., eds.), ISBN 978-3-9816764-7-1 (2021).
4. Osorio Nesme, A., Topic, N. & Delgado, A.: Numerical Simulations for Prognosis of Interface Non-Existence Domains for Prevention and Inhibition of Foam. 13th ECCE and 6th ECAB, Virtual event, 20.-23.9.2021 (2021).
 5. Topic, N., Osorio Nesme, A. & Delgado, A.: Optimal Channels for Prevention of Foam in Structured Packings. 13th ECCE and 6th ECAB, Virtual event, 20.-23.09.2021 (2021).
 6. Delgado, A., Osorio Nesme, A., Hohagen, H. & Cho, M. (Erfinder): Vorrichtung und Verfahren zur Behandlung von Flüssigkeit. Patentanm. 202203011 5373900DE.
 7. Topic, N., Almazán-Torres, L., Osorio Nesme, A. & Delgado, A.: Stability of liquid in triangular channels under quasistatic localized perturbations. J. Fluid Dynam. Res. (submitted).
 8. Almazán-Torres, L., Osorio-Nesme, A., Thünnesen, J. & Delgado, A.: Prevention or inhibition of foam formation in column packings during food processing through identification of non-existence domains at the gas-liquid interface. Poster at 33rd EFFoST Intern. Conf. 2019, 12.-14.11.2019, Rotterdam (2019).
 9. Almazán-Torres, L., Osorio-Nesme, A. & Delgado, A.: Prevention or inhibition of foam formation through identification of non-existence domains in the interface in random and structured column-packings. Proc. 27. GALA-Tag. „Experimentelle Strömungsmechanik“, 3.-5.9.2019, Erlangen (Delgado, A., Gattermig, B., Münsch, M., Ruck, B. & Leder, A., eds.), ISBN 978-3-9816764-6-4 (2019).

TP 2 (DFG)

TP 2 wurde im Ergebnis des DFG/AiF-Begutachtungsverfahrens nicht realisiert.

TP 3 (DFG 40 805 9952)

[Lattice-Boltzmann-Verfahren auf parallelen Hochleistungsrechnern für die Berechnung des Massen- und Impulstransportes schaumfähiger Produkte in Packungskolonnen](#)

Universität Erlangen-Nürnberg
Department Informatik
Lehrstuhl für Systemsimulation
Prof. Dr. Ulrich Rüde

Ziel von Teilprojekt 3 (DFG 40 805 9952) war es, einen Lattice-Boltzmann-Code für die Simulation von Zweiphasenströmungen basierend auf einer Sharp-intraface-Methode zu entwickeln, der zur Identifikation und Analyse von Grenzflächen-Nichtexistenzdomänen eingesetzt werden kann.

Forschungsergebnis

Im Rahmen des Vorhabens wurden numerische Methoden basierend auf der Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) entwickelt und implementiert, die zur Identifikation und Analyse von Grenzflächen-Nichtexistenzdomänen eingesetzt werden können.

Dazu wurde eine im Softwarepaket waLberla bestehende Implementierung der LBM für freie Oberflächen (FSLBM) umfassend überarbeitet und erweitert. Die FSLBM zeichnet sich durch eine hohe Effizienz aus, da die Strömung in der Gasphase als vernachlässigbar angenommen wird. Die Flüssigphase ist lediglich durch Druckkräfte an die Gasphase gekoppelt. Die Grenzschicht zwischen den Phasen wird durch eine einzelne Schicht an Rechenzellen dargestellt. Im Projekt wurden verschiedene Modelle für die Berücksichtigung von Oberflächenspannung und Benetzung implementiert, validiert und verglichen.

Um auch die Strömung in der Gasphase berechnen zu können, wurde ein Phasenfeldmodell basierend auf der konservativen Allen-Cahn-Gleichung implementiert. Im Gegensatz zu anderen Phasenfeldmodellen kann dieses Modell auch für die Simulation von Zweiphasenströmungen mit hohen Dichte- und

Viskositätsunterschieden eingesetzt werden und ist damit für die Simulation von Schäumen geeignet. Anders als bei der FSLBM wird die Grenzschicht zwischen den Phasen jedoch mit ca. 5-10 Rechenzellen aufgelöst. Um die dadurch gestiegenen Anforderungen an Rechenleistung kompensieren zu können, wurde die Effizienz der Implementierung stark optimiert. So werden auf einer einzelnen Grafikkarte bis zu 95 % der möglichen Rechenleistung ausgeschöpft und auf 2.048 Grafikkarten bis zu 98 % parallele Effizienz erreicht. Die Implementierung des Phasenfeldmodells ist vollständig über moderne Metaprogrammierung realisiert und ist damit auch mit geringem Aufwand auf anderen Hardwarearchitekturen ausführbar.

Derzeit ist eine Publikation in Vorbereitung, in der die FSLBM und das implementierte Phasenfeldmodell detailliert anhand verschiedener numerischer Experimente verglichen werden.

Für die Simulation von turbulenten Strömungen wurde im Rahmen des Projekts ein Kumulanten-LBM-Modell implementiert, das sich besonders durch hohe numerische Stabilität auszeichnet. Dieses Modell wurde für die Simulation einer einphasigen, turbulenten Strömung durch eine poröse Geometrie eingesetzt. Um die Effizienz zu steigern, wurde das Rechengitter statisch verfeinert. Die Rechenzeit dieser hochaufgelösten Simulation betrug ca. 18 h auf 36.864 Prozessorkernen des SuperMUC-NG-Großrechners.

Das Modul zur Simulation von Festkörperkollisionen in waLberla wurde erweitert, so dass auch Geometriedaten konkaver Objekte eingelesen werden können. Dadurch können realistische Füllkörperschüttungen erzeugt werden.

Publikationen (Auswahl)

1. FEI-Dokumentation des Web-Abschluss Symposiums zum DFG/AiF-Clustervorhaben (IGF-Plus) „Physikalisch basiertes Management störender Schäume in Produktionsanlagen: Prävention, Inhibierung und Zerstörung“ am 1.3.2022, www.fei-bonn.de/veranstaltungen-termine/cluster-symposien/abschluss-symposium-cluster-2022-03-01 (2022).
2. Ambekar, A. S., Schwarzmeier, C., Rüde, U. & Buwa, V. V.: Particle-resolved turbulent flow in a packed bed: RANS, LES, and DNS simulations. Amer. Inst. Chem. Eng. J., DOI: 10.1002/aic.17615 (2022).
3. Mitchell, T., Holzer, M., Schwarzmeier, C., Bauer, M., Rüde, U. & Leonardi, C.: Stability assessment of the phase-field lattice Boltzmann model and its application to Taylor bubbles in annular piping geometries. Phys. Fluids 33, DOI: 10.1063/5.0061694 (2021).
4. Holzer, M., Bauer, M., Köstler, H. & Rüde, U.: Highly efficient lattice Boltzmann multiphase simulations of immiscible fluids at high-density ratios on CPUs and GPUs through code generation. Intern. J. High Perf. Comp. Appl., DOI: 10.1177/10943420211016525 (2021).
5. Bauer, M., Eibl, S., Godenschwager, C., Kohl, N., Kuron, M., Rettinger, C., Schornbaum, F., Schwarzmeier, C., Thönnies, D., Köstler, H. & Rüde, U.: WALBERLA: A block-structured high-performance framework for multiphysics simulations. Comp. Math. Appl., DOI: 10.1016/j.camwa.2020.01.007 (2020).
6. Rybak, I., Schwarzmeier, C., Eggenweiler, E. & Rüde, U.: Validation and calibration of coupled porous-medium and free-flow problems using pore-scale resolved models. Comp. Geosci., DOI: 10.1007/s10596-020-09994-x (2020).

TP 4 (AiF 1 PN)

Prozess- und Apparatedesign bei der Verdampfung schaumfähiger Stoffsysteme

Technische Universität Braunschweig
Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik
Prof. Dr. Stephan Scholl

Ziel von Teilprojekt 4 (AiF 1 PN) war die Erprobung, Charakterisierung und Bereitstellung apparativer, betrieblicher und additiver Maßnahmen zur Vermeidung oder zur Beherrschung der Schaumbildung bei der Naturumlauferverdampfung.

Forschungsergebnis

Im Rahmen des Vorhabens wurde eine Miniplant mit allen wesentlichen Funktionselementen eines technischen Naturumlaufverdampfers aufgebaut und in Betrieb genommen. Als Stoffsystem dienten wässrige Lösungen mit variierenden Anteilen eines anionischen Tensids. Die Untersuchung des Einflusses der Prozess- und Betriebsparameter auf die Schaumentstehung ergab eine Erhöhung der Schaumbelastung mit steigenden treibenden Temperaturdifferenzen, steigenden Tensidanteilen und sinkenden Betriebsdrücken. Der Wärmeübergang wurde durch die Zugabe von Tensiden nur minimal beeinflusst, während die Umlaufgeschwindigkeit als Maß für die fluiddynamische Betriebsstabilität, besonders bei Wärmestromdichten oberhalb von 50 kW m^{-2} , deutlich reduziert wurde. Der Einsatz prozessinvasiver Maßnahmen zur Schaumzerstörung zeigte, dass sowohl die Einkopplung von Ultraschall als auch die Beregnung mit arteigener Flüssigkeit am Kopf der Anlage zur Schaumzerstörung genutzt werden können. Im Vergleich zur Beregnung war die schaumzerstörende Wirkung des Ultraschalls deutlich geringer. Der Einsatz von Ultraschall beeinflusste allerdings den Verdampfungsprozess nicht, während eine Beregnung den Gesamtenergiebedarf für eine geforderte Verdampfungsleistung erhöhte. Die experimentellen Ergebnisse zeigten, dass die Schaumentstehung im Verdampfer, im Gegensatz zum Auftreten von störenden Schäumen in Kolonnen, nicht zu einer Prozessbeeinträchtigung führte. Für die abgeleitete Schaummanagementstrategie ist es daher ausreichend, die Schaumentstehung durch geeignete Maßnahmen auf ein verträgliches Maß zu begrenzen. Durch die gezielte Steuerung des Prozesses oder den Einsatz prozessinvasiver Schaumzerstörungsmaßnahmen ist zu verhindern, dass das Schaumvolumen eine kritische Grenze überschreitet.

Publikationen (Auswahl)

1. FEI-Schlussbericht 2022.
2. FEI-Dokumentation des Web-Abschluss-symposiums zum DFG/AiF-Clustervorhaben (IGF-Plus) „Physikalisch basiertes Management störender Schäume in Produktionsanlagen: Prävention, Inhibierung und Zerstörung“ am 1.3.2022, www.fei-bonn.de/veranstaltungen-termine/cluster-symposien/abschluss-symposium-cluster-2022-03-01 (2022).
3. Strodtsmann, L. et al.: Operational Performance of a Thermosiphon Reboiler under Foaming Conditions. Chem. Eng. Technol. 45 (8), 1389-1396 (2022).

TP 5 (AiF 2 PN)

Entwicklung optimaler Konzepte für Design und Betrieb von strukturierten Packungskolonnen mittels systematischen Untersuchungen in Schaumkanälen und Schaummesszellen

Technische Universität Berlin
 Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik
 FG Dynamik und Betrieb technischer Anlagen
 Prof. Dr. Jens-Uwe Repke

Ziel von TP 5 (AiF 2 PN) war es, auf Grundlage von zwei- und dreidimensionalen Untersuchungen Design- sowie Betriebskonzepte für Packungskolonnen beim Einsatz mit schäumenden Medien zu erarbeiten, um den Einfluss der Mikro- und Makrostruktur sowie der verwendeten Packungsmaterialien auf die Schaumbildung zu bewerten.

Forschungsergebnis

Es wurde ein Versuchsaufbau zur Analyse der Schaumbildung und des Schaumverhaltens realisiert, welcher wie eine Absorptionskolonne mit einer gegenläufigen Flüssigkeits- und Gasströmung betrieben werden kann. Dazu wurden Packungseinlagen mit transparenten Abdrücken kommerziell erhältlicher strukturierter Packungen angefertigt.

In den experimentellen Untersuchungen wurde zunächst der Ort der Schaumbildung innerhalb von strukturierten Packungen identifiziert, welcher sich im Schaumbildungsdreieck zwischen zwei Kontaktstellen von Packungsblechen und der Talsohle der Mikrostruktur liegt. Mithilfe von quantitativen Messungen des Druckverlusts und des F-Faktors wurde eine Hysterese bei der Schaumbildung identifiziert, welche sich maßgeblich bei vollbenetzter Filmströmung auftritt. Im Falle einer Rinnsalströmung ist die Ausbildung der Hysterese verkürzt, wobei eine Schaumbildung bereits bei geringeren F-Faktoren auftritt. Die Ausbildung der Strömungsform ist dabei maßgeblich vom Kontaktwinkel der festen Oberfläche sowie der Oberflächenbeschaffenheit (Mikrostruktur) abhängig.

Durch den transparenten Aufbau der Packungseinlagen wurden weiterhin experimentelle Analysen mit der Light-Induced-Fluorescence-Methode und einer Highspeed-Kamera durchgeführt und charakteristische Kenngrößen, wie Schaumanteil und Schaumclustergrößenverteilung, ermittelt. Dazu wurde ein entsprechender Auswertalgorithmus entwickelt, welcher automatisiert die Kenngrößen aus aufgenommenen Kameravideos ermittelt und entsprechend aufarbeitet. Aus den Ergebnissen wurde ersichtlich, dass der integrale Messwert des Druckverlusts direkt proportional zum Schaumanteil in der strukturierten Packung ist. Daraus ergibt sich eine normierte Darstellung des Schaumanteils über den F-Faktor, welche die Grenzen der Schaumhysterese verdeutlichen kann.

Weiterhin wurden Voruntersuchungen zum aktiven und passiven Schaummanagement in Kolonnen mit strukturierten Packungen unternommen, wobei verschiedene Ansätze diskutiert wurden. Als vielversprechendsten Ansatz stellte sich die Schaumzerstörung mittels akustischen Schalls im Bereich von <100 Hz dar, welche effektiv die Schaumzerstörung im Bereich der Schaumhysterese unterstützt. Die Einflussfaktoren Frequenz und Lautsprecherleistung wurden entsprechend untersucht und Empfehlungen für die Implementierung in größeren Versuchsanlagen gegeben.

Publikationen (Auswahl)

1. FEI-Schlussbericht 2022.
2. FEI-Dokumentation des Web-Abschluss Symposiums zum DFG/AiF-Clustervorhaben (IGF-Plus) „Physikalisch basiertes Management störender Schäume in Produktionsanlagen: Prävention, Inhibierung und Zerstörung“ am 1.3.2022, www.fei-bonn.de/veranstaltungen-termine/cluster-symposien/abschluss-symposium-cluster-2022-03-01 (2022).
3. Leuner, H., Gerke, S. J., Illner, M. & Repke, J. U.: Foam in Absorption Columns with Structured Packings - Part 1: Characterization. Chem. Eng. Technol. 45 (8), 1424-1430 (2022).
4. Leuner, H., Gerke, S. J., Illner, M. & Repke, J. U.: Foam in Absorption Columns with Structured Packings - Part 2: Inhibition and Destruction. Chem. Eng. Technol. 45 (8), 1431-1437 (2022).
5. Leuner, H., Gerstenberg, C., Lechner, K., McHardy, C., Rauh, C., & Repke, J. U.: Overcoming unwanted foam in industrial processes of the chemical and food industry – an ongoing survey. Chem. Eng. Res. Des. 163, 281-294 (2020).

TP 6 (AiF 3 PN)

Experimentell validierte ingenieurmäßige Optimierung gekoppelter Impuls-, Energie- und Stofftransportprozesse in Behandlungsanlagen schaumfähiger Lebensmittel

Technische Universität Berlin
Institut für Lebensmitteltechnologie und Lebensmittelchemie
FG Lebensmittelbiotechnologie und -prozesstechnik
Prof. Dr. Cornelia Rauh

Universität Erlangen-Nürnberg
Department Chemie- und Bioingenieurwesen
Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Prof. Dr. Antonio Delgado/
Dr. Bernhard Gatternig

Ziel von Teilprojekt 6 (AiF 3 PN) war die Optimierung gekoppelter Impuls-, Energie- und Stofftransportprozesse in großskaligen Produktionsanlagen (Destillations-/Rektifikationskolonnen und Verdampfern) bei der Prozessierung schaumfähiger Lebensmittel.

Forschungsergebnis

Im Rahmen des Vorhabens wurden Modellansätze zur Simulation der Schaumdynamiken sowohl für die Mikroskala auf der Längeneinheit einzelner Lamellen als auch in der Makroskala entwickelt, die sich über die gesamte Schaumstruktur erstreckt.

In der Makroskala wurde eine Erweiterung des inhomogenen Multiple-Size-Group-Modells im Euler-Euler-Ansatz implementiert. Diese besteht aus je einer Gas- und einer Flüssigphase, aber aus drei Geschwindigkeitsfelder - je eines für die Flüssigphase, die disperse Gasphase und die kontinuierliche Gasphase. Durch die Implementierung einer Morphologiefunktion zur Detektion von Schäumen anhand eines kritischen dispersen Gasvolumenanteils können Schaumeigenschaften, wie Permeabilität, Kapillarität, Ostwaldreifung und Blaskollaps, ortsspezifisch in der Berechnungsdomäne aktiviert werden. Während bei der Entstehung und Stabilisierung im Schaum Impulsquellterme aktiviert werden, die entgegen der Drainage wirken, wird die Schaumstrukturvergrößerung und der Schaumzerfall durch Massentransferterme innerhalb und zwischen den Gaskomponenten modelliert. Die angewandten Modelle konnten durch experimentelle Daten und Literaturdaten validiert werden.

In der Mikroskala wurde die Lattice-Boltzmann-Methode genutzt, um im Schaum ablaufende Transportmechanismen unterhalb der Auflösungsgrenze des Euler-Euler-Ansatzes abzubilden. Um Mechanismen, wie Drainage, Ostwaldreifung, thermische Effekte mit und ohne Phasenübergang, Oberflächenspannungsgradienten durch Temperaturgradienten, Kapillar- und nicht-Newtonsche Effekte, zu untersuchen, wurden verschiedene Modellansätze genutzt, da die Vorgänge auf unterschiedlichen Zeitskalen ablaufen. Jedes Teilmodell wurde mit analytischen Lösungen, numerischen Benchmarks-Tests oder experimentellen Daten validiert. Zusätzlich konnten numerische Verfahren zur Untersuchung der physikalischen Eigenschaften von Schäumen auf der Mikroskala generiert werden und mit diesen Methoden zur Entwicklung von Modellgleichungen für die Makroskala generiert werden.

Außerdem wurden Messungen des Interlamellardrucks und Schaumstabilitätsmessungen für verschiedene Flüssigkeiten durchgeführt und für die anderen Teilprojekte zur Verfügung gestellt.

Unter Verwendung des makroskaligen Ansatzes konnten Versuche aus einem Naturumlaufverdampfer abgebildet und eine grobe Abschätzung der Schaumstabilität gegeben werden.

Publikationen (Auswahl)

1. FEI-Schlussbericht 2022.
2. FEI-Dokumentation des Web-Abschluss-symposiums zum DFG/AiF-Clustervorhaben (IGF-Plus) „Physikalisch basiertes Management störender Schäume in Produktionsanlagen: Prävention, Inhibierung und Zerstörung“ am 1.3.2022, www.fei-bonn.de/veranstaltungen-termine/cluster-symposien/abschluss-symposium-cluster-2022-03-01 (2022).
3. Mobarak, M., Gatternig, B., Delgado, A., Bernstein, T., McHardy, C. & Rauh, C.: Foam drainage parametric study using Lattice Boltzmann Method considering the non-Newtonian behavior. Chem. Eng. Technol. 45 (8), 1371-1379 (2022).

4. Bernstein, T., McHardy, C., Horneber, T. & Rauh, C.: CFD Modellierung der Flüssigkeitsdrainage in Schäumen nicht-karbonisierter Getränke mittels eines Euler-Euler Ansatzes. Proc. 27. GALA-Tag. „Experimentelle Strömungsmechanik“, 18.1-18.8, 3.-5.9.2019, Erlangen (Delgado, A., Gattermig, B., Münsch, M., Ruck, B. & Leder, A., eds.) (2019).
5. Mobarak, M., Gattermig, B., Hussein, M., Osorio Nesme, A. & Delgado, A.: Heat transfer in deformable foams by the means of multicomponent Lattice Boltzmann Method. Proc. 27. GALA-Tag. „Experimentelle Strömungsmechanik“, 19.1-19.8, 3.-5.9.2019, Erlangen (Delgado, A., Gattermig, B., Münsch, M., Ruck, B. & Leder, A., eds.) (2019).

TP 7 (AiF 4 PN)

Praxisrelevante Optimierungs- und Bekämpfungsstrategien prozessbeeinflussender Schaumdynamiken in Destillationsanlagen der chemischen und Lebensmittelindustrie

Universität Hohenheim
Institut für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie
FG Hefegenetik und Gärungstechnologie
Prof. Dr. Ralf Kölling-Paternoga

Technische Universität Braunschweig
Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik
Prof. Dr. Stephan Scholl

Ziel des Teilprojekts 7 (AiF 4 PN) war die Identifikation von Ansatzpunkten für die Schaumbeherrschung und das Schaummanagement in Boden- und Packungskolonnen in praxisüblichen destillativen Systemen der Spirituosenindustrie und chemischer Desorptionsanlagen.

Forschungsergebnis

Im Rahmen des Vorhabens wurde insbesondere der Einfluss verdampfungsinduzierter Schäume auf die Trennleistung in Packungskolonnen untersucht.

Dazu wurden eine Rektifikationsanlage im Technikumsmaßstab ausgelegt, aufgebaut und in Betrieb genommen sowie eine Rektifikationsanlage im Labormaßstab aufgebaut. Darin wurden experimentelle Untersuchungen mit schaum-sensitive Grenzstandsensoren erfolgreich durchgeführt. Mithilfe kapazitiver Sensoren konnten Schaumstände sowie Flüssigkeitsgehalte von Schäumen erfolgreich detektiert werden.

Zusätzlich wurde eine Methode zur Charakterisierung von verdampfungsinduzierten Schäumen erarbeitet. Diese erlaubt die Erfassung stofflicher, apparativer und betrieblicher Einflussgrößen auf die verdampfungsinduzierte Schaumbildung.

Untersuchungen zur passiven Schauminhibierung und Schaumzerstörung zeigten, dass Schaum von metallischen Füllkörpern aufgrund höherer Quervermischung effektiver destabilisiert wird als in strukturierten Packungen. Als vielversprechender Ansatz zur passiven Schauminhibierung erwies sich eine moderate Überhitzung von Oberflächen über den Siedepunkt des Leichtsieders oder des Lösemittels. Betriebsweisen mit reduzierten Wärmestromdichten bei der Verdampfung stellten eine effektivere Schauminhibierungsmethode dar als die aktive Schaumbekämpfung mittels Beregnung.

Publikationen (Auswahl)

1. FEI-Schlussbericht 2022.
2. FEI-Dokumentation des Web-Abschluss-symposiums zum DFG/AiF-Clustervorhaben (IGF-Plus) „Physikalisch basiertes Management störender Schäume in Produktionsanlagen: Prävention, Inhibierung und Zerstörung“ am 1.3.2022, www.fei-bonn.de/veranstaltungen-termine/cluster-symposien/abschluss-symposium-cluster-2022-03-01 (2022).

3. Strodtmann, L., Staud, R., Klinke, T., Jasch, K. & Scholl, S.: Quantification of boiling-induced foaming ability Evaporation or boiling -induced foaming ability. Chem. Eng. Res. Des. avail. online 19.1.2022, in press, Journal Pre-proof, DOI: 10.1016/j.cherd.2022.01.021 (2022).
4. Staud, R., Heller, D., Knüpfer, L., Heitkam, S., Einfalt, D., Jasch, K. & Scholl, S.: Minimal-invasive method for the evaluation of liquid fractions in foams with a point level sensor. Chem. Eng. Technol. 45 (8), 1397-1403 (2022).

TP 8 (AiF 5 PN)

Charakterisierung, Simulation und Erprobung ausgewählter physikalischer Schaumzerstörungsverfahren in großskaligen Produktionsanlagen

Universität Erlangen-Nürnberg
Department Chemie- und Bioingenieurwesen
Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Prof. Dr. Antonio Delgado

Technische Universität Berlin
Institut für Lebensmitteltechnologie und Lebensmittelchemie
FG Lebensmittelbiotechnologie und -prozesstechnik,
Prof. Dr. Cornelia Rauh

Technische Universität Berlin
Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik FG Dynamik und Betrieb technischer Anlagen
Prof. Dr. Jens-Uwe Repke

Ziel von Teilprojekt 8 (AiF 5 PN) als zentralem Koordinierungsprojekt des Clusters war die Modellierung, Simulation und Optimierung von Schaumzerstörungsmechanismen, die Konzeption und Erprobung von fluidmechanischen, thermischen und akustischen Aktoren sowie die Entwicklung einer leicht bedienbaren Nutzerplattform und eines Prognosetools für KMU.

Forschungsergebnis

FS 1

An Forschungsstelle (FS) 1 wurde im Labormaßstab eine Glaskolonne gefertigt, die als Versuchsstand zur Erprobung von physikalischen Aktoren zur Schaumzerstörung genutzt wurde. Darin wurden unter anderem die Auswirkungen von thermischen Aktoren, Beregnung mit arteigener Flüssigkeit sowie der Einsatz von Ultraschall untersucht. Der Einsatz von thermischen Aktoren zeigte zwar erfolgreich einen Effekt auf die Schaumzerstörung, führte aber zu chemischen Veränderungen des Schaumes durch Karamellisieren und Maillard-Reaktionen. Bei der Beregnung konnte der Schaum aktiv zerstört werden, wobei bei längerer Anwendung die Sekundärschaumbildung zunimmt. Hierbei war der wichtigste Einflussparameter die Behandlungsdauer, die möglichst kurzgehalten werden sollte.

In der Glaskolonne wurden auch experimentelle Untersuchungen zur Ultraschallzerstörung in Schäumen untersucht. Dazu wurden die Blasen mittels Eigenmodusanregung durch unterschiedliche Transducer unter unterschiedlichen Randbedingungen zerstört. Als Fazit können eine flüssigkeitsnahe Einbringung der Ultraschallwellen bei Frequenzen zwischen 42 bis 168 kHz als Empfehlung ausgesprochen werden. Damit ist die einzusetzende Leistungsdichte auf die Schaumfläche um 2 Größenmagnituden kleiner als Referenzsysteme aus der Literatur.

Weiterhin wurde an Forschungsstelle 1 ein Demonstrator entwickelt und in Betrieb genommen, der im Pilotmaßstab die Kombination unterschiedlicher Schaumzerstörungsmethoden unter unterschiedlichen Bedingungen bezüglich der Temperatur ermöglicht. Dabei wurde die Schaumzerstörung mittels einer Düse und

Ultraschallaktoren kombiniert. Durch die Kombination der beiden Methoden konnte der Zeitabstand zwischen den Einsätzen der jeweiligen Methoden vergrößert werden.

FS 2

In den Arbeiten der Forschungsstelle 2 wurde ein experimenteller Aufbau entwickelt, der die Schaumfähigkeit von Lebensmitteln und Tensid-Lösungen über die Schaumhöhe, die Blasengrößenverteilung und den Flüssigkeitsgehalt charakterisiert.

Des Weiteren wurde ein Modell für die Simulierung der Schaumzerstörung im Euler-Euler-Ansatz entwickelt. Hierfür wurden verschiedene Modellansätze aus Literatur und Eigenentwicklung implementiert, um Stoff- und Transportparameter über Mischungsregeln sowie die Schaumzerstörung zu beschreiben. Durch einen Vergleich der experimentell bestimmten Temperaturverläufe innerhalb der Kolonne aus AP 3 konnte der Strahlungstransport validiert werden. In anschließenden Schaumsimulationen konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung einer gerichteten Strahlungsquelle bereits nach 15 s die Schaumhöhe um 10 - 20 % im Vergleich zu einem diffusen thermischen Strahler reduziert werden kann. Im Falle von feuchter Luft oberhalb des Schaumes kann eine weitere Reduktion der Schaumhöhe um 25 - 30 % erzielt werden, wenn eine monochromatische Strahlungsquelle bei 10,6 μm anstelle eines breiten Emissionsspektrums verwendet wird. Als monochromatische Strahlungsquelle bieten sich hier besonders CO₂-Laser an.

Für die Umsetzung eines Prognose- und Diagnosetools wurde auf künstliche neuronale Netze (KNN) zurückgegriffen. So konnte mit verschiedenen KNNs für die Packungskolonne (TP 8) sowie den Naturumlaufverdampfer (TP 4) die Neigung der Anlage zur Schaumbildung erfolgreich dargestellt werden. Weiterhin konnte für den Demonstrator aus AP 7 die Schaumbildung selbst für komplexe Interaktionen zwischen zwei Schaumzerstörungsmethoden, der Beregnung mit arteigener Flüssigkeit und dem Ultraschall abgebildet werden.

FS 3

Es wurde eine Umfrage unter den im Cluster teilnehmenden Firmen durchgeführt, um den aktuellen Stand der Schaumproblematik in verfahrenstechnischen Prozessen der Chemie- und Lebensmittelindustrie zu erfassen. Dabei wurden Fragen zu Prozess, beteiligten Stoffen, Auswirkung der Schaumbildung und angewandten Schaummanagementmethoden formuliert. Ersichtlich wurde, dass in der chemischen Industrie vor allem Destillations- und Absorptionskolonnen und in der Lebensmittelindustrie vor allem Behälter von Schaumproblemen betroffen sind. Die schaumverursachenden oberflächenaktiven Stoffe sind dabei in der Mehrzahl der Prozesse unterschiedlich, wobei hauptsächlich Prozesse mit dem Lösungsmittel Wasser betroffen sind. Bei einem Fünftel der Prozesse folgt auf die Schaumbildung das Abfahren des Prozesses. Im Schaummanagement wurden im Rahmen der Umfrage der Einsatz von Antifoam-Agent, Ultraschall und die Änderung des Designs als beste Maßnahmen gegen die Schaumbildung genannt.

Im Rahmen des Vorhabens wurden passive Schaummanagementmethoden erforscht und dabei der Einfluss der Mikrostruktur, sowie der Einsatz von Spacern zwischen den Packungslagen in einer DN300-Kolonne untersucht. Dabei wurde ersichtlich, dass Packungen ohne Mikrostruktur eine geringere Schaumbelastung aufweisen bei wenig und stark schäumenden Zuständen. Spacer können bei schnell zerfallenden Schäumen die natürliche Schaumzerstörung zwischen Packungslagen unterstützen, jedoch fördern sie auch die Flüssigkeits- und Gasfehlverteilung über den Querschnitt der Kolonne.

Zum aktiven Schaummanagement wurden Vor- und Nachteile verschiedener Methoden diskutiert und dokumentiert. Die zuvor als vielversprechend eingeschätzte Methode zur Schaumzerstörung mittels akustischen Schalls wurde ebenfalls in der DN300-Kolonne umgesetzt und eingehend untersucht. Dabei wurde ersichtlich, dass die Schaumzerstörung auch in diesem Maßstab innerhalb der strukturierten Packung möglich ist. Bei der Beschallung der schaumbelasteten Bereiche in einer Kolonne entsteht dabei eine aktive Zone der Schaumzerstörung. Unterhalb dieser Zone kann es jedoch zur verstärkten Schaumbildung kommen, weshalb für die Größe der Kolonne geeignete Lautsprecher zur effektiven Schaumzerstörung notwendig sind.

Publikationen (Auswahl)

1. FEI-Schlussbericht 2022.
2. FEI-Dokumentation des Web-Abschluss-symposiums zum DFG/AiF-Clustervorhaben (IGF-Plus) „Physikalisch basiertes Management störender Schäume in Produktionsanlagen: Prävention, Inhibierung und Zerstörung“ am 1.3.2022, www.fei-bonn.de/veranstaltungen-termine/cluster-symposien/abschluss-symposium-cluster-2022-03-01 (2022).
3. Thünnesen, J., Gerstenberg, C., Heller, D., Leuner, H., Einfalt, D., McHardy, C., Gatternig, B., Rauh, C., Repke, J.-U. & Delgado, A.: Resonant ultrasonic defoaming in aqueous evaporation/boiling processes at different size scales. *Chem. Eng. Technol.* 45 (8), 1380-1388 (2022).
4. Leuner, H. et al.: Foam in Absorption Columns with Structured Packings – Part 1: Characterization. *Chem. Eng. Technol.* 45 (8), 1424-1430 (2022).
5. Leuner, H. et al.: Foam in Absorption Columns with Structured Packings – Part 2: Inhibition and Destruction. *Chem. Eng. Technol.* 45 (8), 1431-1437 (2022).
6. Thünnesen, J., Gatternig, B. & Delgado, A.: Destruction of unwished foams in thermal processes with ultrasound in self-excitation mode transmitted via the liquid phase. 35th EFFoST Intern. Conf. 2021, Lausanne (2021).
7. Thünnesen, J., Gatternig, B. & Delgado, A.: Zerstörung von unerwünschten Schäumen in thermischen Prozessen mit eigenresonanten Ultraschall. Proc. 28. GALA-Tag. „Experimentelle Strömungsmechanik“, 7.-9.9.2021, Bremen (2021).
8. Gerstenberg, C., Morelle, E., McHardy, C. & Rauh, C.: Messung der lokalen Blasengrößenverteilung und des Flüssigkeitsgehalts in wässrigen Schäumen zur Validierung von CFD-Simulationen. Proc. 28. GALA-Tag. „Experimentelle Strömungsmechanik“, 47-1 - 47-8, 7.-9.9.2021, Bremen (Fischer, A., Stöbener, D., Vanselow, C., Ruck, B. & Leder, A., eds.) (2021).
9. Thünnesen, J., Beck, T., Gatternig, B. & Delgado, A.: Influence of frequency and location in the defoaming of mechanically and thermally produced foams with ultrasound in the food industry. 34th EFFoST Intern. Conf. 2020, 10.-12.11.2020, Tel-Aviv (2020).
10. McHardy, C.: Recent results of the DFG/AiF Cluster: Physically-based management of disruptive foams in production plants: Prevention, inhibition and destruction. Proc. 1st VH Online Yeast Conf., 14.-15.9.2020 (2020).
11. Leuner, H. et al.: Overcoming unwanted foam in industrial processes of the chemical and food industry – an ongoing survey. *Chem. Eng. Res. Des.* 163, 281-294 (2020).
12. Gerstenberg, C., Baur, A., McHardy, C., Delgado, A. & Rauh, C.: Validated CFD simulation of natural convection of air at high temperatures with radiation transport. *Intern. J. Heat Mass Transfer* (in Vorbereitung).
13. Gerstenberg, C., Morelle, E., McHardy, C. & Rauh, C.: Local characterization of the bubble size distribution and the liquid content in aqueous foams. *J. Food Eng.* (in Vorbereitung).

Weiteres Informationsmaterial

Universität Erlangen-Nürnberg
Department Chemie- und Bioingenieurwesen
Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Cauerstraße 4, 91058 Erlangen
Tel.: +49 9131 85-29500
Fax: +49 9131 85-29503
E-Mail: antonio.delgado@fau.de

Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI)
Godesberger Allee 125, 53175 Bonn
Tel.: +49 228 3079699-0
Fax: +49 228 3079699-9
E-Mail: fei@fei-bonn.de

Förderhinweis

... ein Projekt der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)

Gefördert durch:



Das o. g. IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Godesberger Allee 125, 53175 Bonn, wird/wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Bildnachweis - Seite 1: © AdobeStock_358555763

Stand: 21. März 2022