

Wissensbasierte Prozessführungsstrategie zur stoffadaptiven Vermeidung des Überschäumens beim Abfüllen schaumfähiger, nicht-karbonisierter Getränke



Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Bonn
Forschungsstelle(n):	Technische Universität Berlin Institut für Lebensmitteltechnologie und Lebensmittelchemie FG Lebensmittelbiotechnologie und -prozessstechnik Prof. Dr. Cornelia Rauh/Dr. Christopher McHardy Universität Erlangen-Nürnberg Department Chemie- und Bioingenieurwesen Lehrstuhl für Strömungsmechanik Prof. Dr. Antonio Delgado/Dr. Bernhard Gattermig
Industriegruppe(n):	Verband der deutschen Fruchtsaft-Industrie e.V. (VdF), Bonn Bundesverband der Deutschen Süßwarenindustrie e.V. (BDSI), Bonn
Projektkoordinator:	Dipl.-Ing. Matthias Schulz Diesdorfer Süßmost-, Weinkelterei & Edeldestille GmbH, Diesdorf
Laufzeit:	2017 – 2020
Zuwendungssumme:	€ 498.140,--

Ausgangssituation

Bei der Abfüllung nicht-karbonisierter Getränke kommt es in der Praxis häufig zu einer unerwünschten Schaumbildung, die die Produktion negativ beeinflusst (Anlagenausbringung, Abfüllungsgenauigkeit, Produktverlustmenge, Hygiene des Abfüllprozesses). So muss sich die Abfülldynamik i. d. R. dem Schaumbildungsvermögen des abzufüllenden Produktes anpassen. Das Überschäumen bestimmt auch die Notwendigkeit und Häufigkeit der Flaschen- und Anlagenreinigung inkl. des damit verbundenen Einsatzes von Energie, Reinigungs- und Betriebsmitteln und der damit verbundenen Kosten. Vereinzelt verhindert ein unkontrollierter Schaumaustritt – etwa bei Obstsaften – schlichtweg den Einsatz einer aseptischen Abfüllung.

Die größte wirtschaftliche Bedeutung besitzt das unerwünschte Überschäumen bei Orangensaft, mit einer Produktionsmenge von 565 Mio. L/Jahr (2019). Weitere Beispiele sind Säfte aus Ananas oder Roten Früchten sowie faserhaltige Säfte. Im Segment der Gemüsesäfte liegt ein besonders hohes Überschäumrisiko bei Rote-Bete- oder Sauerkrautsäften vor.

Zum Überschäumen tragen folgende Effekte bei: (i) die von der Strömungsdynamik induzierte Freisetzung chemisch gelöster Gase aus der flüssigen Phase bzw. der induzierte Gaseintrag an der Getränkeoberfläche, (ii) die bei faserhaltigen Getränken zusätzlich stattfindende Freisetzung der an den Fasern anhaftenden Mikroblasen, (iii) die Anwesenheit oberflächenaktiver Stoffe, die für das Schaumbildungsvermögen verantwortlich sind und (iv) die aus der stofflichen Zusammensetzung eines Saftes resultierenden physikalischen Eigenschaften (Dichte, Oberflächenspannung, Benetzungswinkel und rheologische Stofffunktionen).

Die Eindämmung des Überschäumens durch selektive Entfernung von schaumfördernden, oberflächenaktiven Substanzen aus dem Saft ist wenig zielführend. Diese Substanzen bedürfen – spezifisch für jedes einzelne Getränk – einer aufwändigen, in kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) kaum umsetzbaren Identifizierung sowie einer Präzisierung ihrer schaumfördernden Wirkung. Auch der Zusatz chemischer Substanzen (Anti-Schaum) scheidet aus Gründen der Lebensmittelsicherheit aus.

In der Praxis begegnet man der Schaumbildung derzeit mit rein physikalischen Ansätzen und mit Maßnahmen, die dem Grundmechanismus der Schaumbildung durch die Abfülldynamik entgegenwirken. So verringert etwa die Vermeidung der dynamischen Erzeugung von Unterdruckgebieten durch lokale Beschleunigung im flüssigen Produkt sowie das Abfüllen unter erhöhtem Druck die Gefahr der Blasenbildung durch die Freisetzung gelöster Gase. Die Induktion von Zentrifugalkräften, etwa durch Dralldüsen, stabilisiert die freie Flüssigkeitsoberfläche gegen die Erzeugung von neuen Oberflächen durch Gaseinschluss auch im ohnehin praktisch nicht vermeidbaren turbulenten Strömungsregime. Auch die Befüllung der Flasche mit einer Strömung entlang der Gefäßwand oder mit einer bis unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche reichenden Abfülldüse gehören zu bewährten Methoden, um den Impulsaustausch an der Oberfläche und somit deren dynamisches Aufreißen inkl. der nachgeschalteten Erzeugung von neuen Oberflächen durch Gasinklusion zu reduzieren. Bei einem Wechsel des Produkts oder der Abfüllprozedur kommt es jedoch bei Herstellern und Abfüllern stets zu Unsicherheiten, die die Unternehmen vor große Herausforderungen stellen. Besonders betroffen hiervon sind kleinere Betriebe, bei denen aufgrund kleinerer Produktionschargen häufige Produktwechsel stattfinden.

Ziel des Forschungsvorhabens war es daher, eine KNN-basierte Prozessführungsstrategie zu entwickeln und dynamisch entstehende Schaumschichten durch nicht-invasive, akustische oder alternativ thermische Schaumzerstörungsmechanismen während des Abfüllprozesses einzuschränken oder zu beseitigen.

Forschungsergebnis

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Werkzeuge zur Vorhersage der Schaumbildung bei der Abfüllung verschiedener Getränke, thermische und akustische Aktuatoren zur gezielten Schaumzerstörung sowie ein Neuroregler zur Einstellung optimierter Betriebsbedingungen entwickelt und evaluiert. Hierzu wurde die Schaumbildung bei der Abfüllung von nicht-karbonisierten Getränken experimentell charakterisiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Schaumhöhe zunächst nahezu linear ansteigt und im weiteren Verlauf des Füllens stark durch die Form des Flaschenhalses beeinflusst wird. Die entstehenden Schäume weisen starke morphologische Ähnlichkeiten auf und können als nass und polydispers mit Blasengrößen im Bereich von 0,1 - 2 mm beschrieben werden.

Ursächlich für die Schaumentwicklung ist der kontinuierliche Eintrag von Gas durch den Füllstrahl. Die Menge des eingetragenen Gases und die beobachtbare Schaumentwicklung hängen primär von der Füllgeschwindigkeit ab und sind zudem von den physikalischen Stoffeigenschaften der Getränke bestimmt. Numerische Simulationen des Abfüllvorgangs zeigen einen Zusammenhang zwischen Schaumbildung bzw. Blasen eintrag und der Weber-Zahl des Füllstrahls. Physikalisch gelöste Gase in der Flüssigkeit spielen eine untergeordnete Rolle für die Schaumbildung.

Aufgrund der Komplexität der Schaumbildung im Abfüllprozess wurde zur Vorhersage der Ansatz eines Rekurrenten Neuronalen Netzes gewählt, der auch eine Berücksichtigung der Prozessdynamik zulässt. Mit Hilfe des Modells konnte die zeitabhängige Schaumbildung für 12 verschiedene Testgetränke in Abhängigkeit der Füllgeschwindigkeit und -temperatur mit einem mittleren Fehler von 3,44 mm vorgesagt werden.

Zur gezielten Zerstörung von Schäumen wurden Ultraschall und thermische Strahlung eingesetzt. Beschallung über die Luft wirkt vor allem an der Oberfläche des Schaums, während eine Beschallung über die Flaschenwand zu einer beschleunigten Schaumzerstörung führt. Unabhängig von der Schallfrequenz kann so die Schaumhöhe bei einer Leistung von 20 bzw. 36 W in für den Füllprozess relevanten Zeiten um mehrere Zentimeter vermindert werden, vor allem zu Beginn des Füllens und beim Eintritt in den Flaschenkonus. Hydrophonomessungen zeigen, dass der Gaseintrag durch den Füllstrahl sowie gelöste Gase im Getränk den Schalldruck und die

Effizienz des Ultraschalls zur Schaumzerstörung verringern. Im Fall der thermischen Strahlung zeigen die Projektergebnisse, dass die Schaumzerstörung prinzipiell möglich, aber aufgrund des Energie- und Zeitbedarfs für den Abfüllprozess unwirtschaftlich und nicht einsetzbar ist.

In weiteren Arbeiten wurde eine Volumenstromregelung für den Abfüllprozess mit der Schaumbildung als Regelgröße entwickelt. Von den getesteten Reglerentwürfen haben sich besonders nicht-lineare Regler und adaptive Regelverfahren als vielversprechend erwiesen. Diese ermöglichen eine präzise Einstellung der Nennfüllmenge unter Berücksichtigung des entstehenden Schaums.

Die entwickelten Werkzeuge wurden zum Projektende in Praxisversuchen (Heiß- und Kaltabfüllung) im Fülltechnikum eines Mitglieds des Projektbegleitenden Ausschusses getestet, wobei die hemmende Wirkung von Ultraschall auf die Schaumbildung nachgewiesen werden konnte.

Wirtschaftliche Bedeutung

Mit 561 Betrieben und 61.000 Beschäftigten sowie einem Jahresumsatz von rd. 21 Mrd. € stellt die Getränkeindustrie einen der wichtigsten Zweige der deutschen Lebensmittelindustrie dar. Rund 55 % dieser Betriebe haben 20 bis 50 Beschäftigte. Knapp die Hälfte der 561 Betriebe sind der Erfrischungsgetränke- und Fruchtsaftproduktion zuzuordnen. Produktionsstätten und Betriebe dieser Größe haben für gewöhnlich Abfüllkapazitäten mit 15.000 - 20.000 Packungen pro Stunde. Diese Unternehmen verfügen i. d. R. über Abfülllinien für Hart- oder Weichverpackungen und branchenübliche Abfüllanlagen. In diesen Fülllinien werden oftmals mehrere bzw. sämtliche flüssigen Produkte chargenweise heiß oder kalt abgefüllt. Derartige Fülllinien werden i. d. R. von bis zu 5 Mitarbeitern pro 8-Stunden-Schicht betreut.

Wichtigster und sensibelster Schritt ist die Abfüllung der Getränke in die Verpackungen. Hierbei kann es bei vielen Getränken während des Füllvorganges zur Schaumbildung kommen, mit der Folge, dass Unterfüllungen auftreten und insbesondere bei der kaltseptischen Abfüllung hygienische Probleme entstehen. Bei der heißen Glasflaschenabfüllung mit bereits pasteurisierten Getränken werden Flaschen i. d. R. randvoll gefüllt, um den Kopfraum auszufüllen. Bei schäumenden Flüssigkeiten wird der Kopfraum bereits vor Erreichen der nötigen Mindestfüllmenge mit Schaum gefüllt. Dies bedingt teilweise beachtliche Unterfüllungen der Packungen oder Flaschen. Um den genannten Problemen entgegenzuwirken, reagiert die Praxis in der Regel mit einer Drosselung der Abfüllleistung.

Die Entwicklung einer wirksamen Schaumkontrolle, wie sie im Fokus des Vorhabens stand, vermeidet Reklamationen durch den Handel und Endkunden sowie Beanstandungen der Kontrollbehörden (aufgrund der Fertigungspackungsverordnung). Ebenso lässt sich die Ausschleusung durch nachgeschaltete Füllmengeninspektoren verringern und die Produktivität und Effizienz der Füllanlagen erhöhen.

Publikationen (Auswahl)

1. FEI-Schlussbericht 2020.
2. Thünnesen, J., Beck, T., McHardy, C., Morelle, E., Rudolph, A., Rauh, C., Gatternig, B. & Delgado, A.: Wissensbasierte Prognose, Zerstörung und Prävention unerwünschter Schäume bei der Abfüllung nicht-karbonisierter Getränke: Teil 2. Flüssiges Obst 88 (1), 12-16 (2021).
3. Panckow, R., McHardy, C., Rudolph, A., Muthig, M., Kostova, J., Wegener, M. & Rauh, C.: Characterization of fast-growing foams in bottling processes by endoscopic imaging and convolutional neural networks. J. Food Eng. 289, 110151 (2021).
4. Thünnesen, J., Gatternig, B. & Delgado, A.: Ultrasonic Effects on Foam Formation of Fruit Juices during Bottling. Eng. 2 (3), 356-371 (2021).
5. Morelle, E., Rudolph, A., McHardy, C., & Rauh, C.: Detection and prediction of foam evolution during the bottling of noncarbonated beverages using artificial neural networks. Food Bioprod. Proc. 128, 63-76 (2021).

6. McHardy, C., Morelle, E., Rudolph, A., Thünnesen, J., Beck, T., Gatternig, B., Delgado, A. & Rauh, C.: Wissensbasierte Prognose, Zerstörung und Prävention unerwünschter Schäume bei der Abfüllung nicht-karbonisierter Getränke: Teil 1. Flüssiges Obst 87 (12), 408-413 (2020).
7. Beck, T., Gatternig, B. & Delgado, A.: Schaum- und Füllstanderkennung mittels optischer Systeme mit neuronalen Algorithmen. Proc. 27. GALA-Fachtag. „Experimentelle Strömungsmechanik“ 17-1 bis 17-7 (2019).
8. Thünnesen, J., Gatternig, B. & Delgado, A.: Einfluss von Hochleistungs-Ultraschall auf Getränkeschäume. Proc. 27. GALA-Fachtag. „Experimentelle Strömungsmechanik“ 16-1 bis 16-8 (2019).
9. Bernstein, McHardy, C., Horneber, T. & Rauh, C.: CFD-Modellierung der Flüssigkeitsdrainage in Schäumen nicht-karbonisierter Getränke mittels eines Euler-Euler-Ansatzes. Proc. 27. GALA-Fachtag. „Experimentelle Strömungsmechanik“, 18-1 bis 18-8 (2019).
10. McHardy, C., Thünnesen, J., Horneber, T., Kostova, J., Hussein, M. A., Delgado, A. & Rauh, C.: Active control of foams by physically based destruction mechanisms. PAMM 18 (1), e201800351 (2018).
11. McHardy, C., Rudolph, A., Panckow, R. P., Kostova, J., Wegener, M. & Rauh, C.: Morphologische Charakterisierung von Schäumen bei der Abfüllung nicht-karbonisierter Getränke. Proc. 26. GALA-Fachtag. „Experimentelle Strömungsmechanik“ 46-1 bis 46-8 (2018).

Weiteres Informationsmaterial

Technische Universität Berlin
 Institut für Lebensmitteltechnologie und Lebensmittelchemie
 FG Lebensmittelbiotechnologie und -prozessechnik
 Königin-Luise-Straße 22, 14195 Berlin
 Tel.: +49 30 314-71254
 Fax: +49 30 832-7663
 E-Mail: cornelia.rauh@tu-berlin.de

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: © Verband der deutschen Fruchtsaft-Industrie e.V. (VdF)

Stand: 28. März 2022