

Einfluss von Hochleistungs-Ultraschall auf Getränkeschäume

Influence of high-performance ultrasound on beverage foams

Julian Thünnesen, Bernhard Gattermig, Antonio Delgado

Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen/Nürnberg,
Cauerstraße 4, 91058 Erlangen
Email: julian.thuennesen@fau.de

Ultraschall, Entschäumung, Fruchtsäfte
Ultrasound, defoaming, fruit juices

Zusammenfassung

In der Getränkeindustrie kommt es bisweilen zur ungewünschten Schaumbildung während der Flaschenabfüllung von Säften, die zur Verringerung der Abfüllgeschwindigkeit und Dosiergenauigkeit führen. Um die Schaumbildung zu verringern, erweist sich Ultraschall als eine effektive Methode (Gallego-Juárez et al., 2015). Es wird vermutet, dass der Ultraschall Oberflächenwellen auf den Flüssigkeiten erzeugt, die Drainage im Schaum erhöht und den Schaum dadurch destabilisiert (Sandor und Stein, 1993; Morey et al., 1999). Hinzu kommen noch frequenzabhängige Eigenresonanzeffekte der Schaumblasen, wurden bereits in einer früheren Arbeit beobachtet, die sich der Optimierung von Sacklöchern in Mikrometerbereich widmete (Vaidya et al., 2016). Sie wurden aber im Hinblick auf einen forcierten Schaumzerfall bislang noch nicht betrachtet.

Thema des Beitrags ist die Betrachtung des Schaumzerfalls unter dem Einfluss von Ultraschall unterschiedlicher Frequenzen. Es werden Ergebnisse von Versuchen vorgestellt, bei denen Schäume von Säften mit unterschiedlichen Ultraschallfrequenzen (35-120 kHz) zum Zerfall gebracht wurden. Neben der Erfassung der verringerten Schaumhöhe, nahm eine Hochgeschwindigkeitskamera (Fa. Shimadzu, 1 Mfps) die Lamellenvibrationen während der Beschallung auf. Es wurde ersichtlich, dass frequenzabhängig unterschiedliche Blasengrößen resonierten und kollabierten, der Tröpfchenauswurf aus den Lamellen verändert wurde.

Einleitung

In der Praxis führt oft unerwartetes Aufschäumen nicht-karbonisierter Getränke während der Abfüllung zu Störungen, die sowohl technisch als auch ökonomisch gesehen eine Herausforderung darstellen. Darunter fallen auch eine geringere Abfüllgenauigkeit, höhere Produktverlustmengen und eine schnellere Verschmutzung der Abfüllanlage. Die Schaumfähigkeit von Getränken resultiert aus dem Verhältnis von Schaumbildung und -zerfall. Während die Schaumbildungsrate von einer Kombination aus Blasenbildung und -aufstieg, oberflächenaktiven Proteinen, Emulgatoren und Agglomeratbildung durch feste Partikel resultiert, basiert der Schaumzerfall im Wesentlichen auf der Disproportionierung, Drainage und Koaleszenz (Cantat et al., 2013). Für die Ultraschall basierte Schaumzerstörung ist die Drainage, die den Erdbeschleunigung bekräftigten Flüssigkeitsfluss aus dem Schaum darstellt, von besonderer Interesse (Koehler et al., 1998; Cohen-Addad et al., 2013). Sandor und Stein (Sandor und Stein, 1993) folgerten nach Entschäumungsversuchen von

Wasser/Sodiumdodecylsulfat-Proben mit Ultraschall bei 20 kHz, dass mehrere Mechanismen im Schaum durch die Schallwellen erzeugt wurden:

1. Vibrationen erzeugen Oberflächenwellen auf den Flüssigkeiten
2. in Schaumsystemen, die aus dünnen Flüssigkeitslamellen bestehen, können Oberflächenwellen an einer Oberfläche eines Films nur dann bestehen, wenn sie von Wellen auf der gegenüberliegenden Seite des Films begleitet werden.
3. Teil solcher kooperierender Wellen werden von zusammenstauendem Charakter und demnach für eine erhöhte Filmdrainage verantwortlich sein
4. die erhöhte Filmdrainage wird zu einem schnelleren Erreichen der kritischen Lamellendicke führen und deshalb den Schaum destabilisieren.

Darüber hinaus liefert die Literatur Anwendungsbeispiele in der Ultraschallmesstechnik, die auf die Resonanzbeziehung zwischen Blasen in Flüssigkeiten und Ultraschallwellen basieren und eine Dämpfungserhöhung messen (Medwin, 1977; Leroy et al., 2008; Leroy et al., 2009). Diese Wechselwirkungen sind primär Blasenoszillationen, die zum einen abhängig von der jeweiligen Blasengröße und zum anderen abhängig von der Frequenz der auftretenden Ultraschallwelle sind.

Das Resonanzverhältnis zwischen Blasenradius und Frequenz der eintreffenden Ultraschallwelle hängt von der Dichte, Viskosität und Oberflächenspannung der umgebenden Flüssigkeit ab. Dieses Verhältnis wurde von Rayleigh et al. beschrieben (Leighton, 2007):

$$f_R = \frac{1}{2\pi r_R} \times \sqrt{\frac{3\gamma \left(p_0 + \frac{2\sigma}{r_R}\right) - \frac{2\sigma}{r_R}}{\rho_{Fluid}}} \quad (1)$$

Daraus resultierte der theoretische Ansatz dieses Beitrags, dass Schaum ebenfalls mit höheren Frequenzen jenseits der 20 kHz zerstört werden kann, da die oben erwähnten Resonanzeffekte die Blasen und Lamellen soweit in Bewegung versetzen, dass die Drainage erhöht wird.

Material und Methoden

Für die Ultraschallversuche wurde ein Abfüllstand mit einem flaschenähnlichen Gefäß gebaut, der den Abmessungen einer 1 Liter VdF-Flasche nachempfunden wurde. Das Gefäß besitzt, im Gegensatz zu einer richtigen Flasche, einen Ablauf, einen abnehmbaren Konus, plane Sichtfenster an der zylindrischen Seitenwand und einen austauschbaren Boden.

Letzteres ermöglichte die direkte Anbringung von 50 W Plattentransducern mit den Frequenzen 80 und 120 kHz (Fa. Weber-Ultrasonics, Karlsbad, Deutschland). Durch Abnehmen des Konus, konnte ebenfalls eine 35 kHz Stabsonotrode (UP200T, Hielscher, Deutschland) in das Gefäß gehalten werden. Der Saft floss durch einen 50 mm breiten Füllstutzen in das Gefäß ein. Die Füllgeschwindigkeit wurde über eine Kreiselpumpe auf 45,8 ml/s eingestellt. Der Abfüllgeschwindigkeit und die entstandene Schaumhöhe wurden über eine CCD-Kamera (acA2500-60uc, Basler, Deutschland) von der Seite vermessen. Die Vermessung wurde nur bis zu einem Flüssigkeitspegel von 100 mm durchgeführt.

Es wurden zwei Szenarien durchgeführt. Zum einen wurde über die Stabsonotrode aus der Luft beschallt und zum anderen vom Boden aus durch den Saft. Bei der Beschallung vom Boden aus wurden die obengenannten Plattentransducer mit den Frequenzen 80 und 120 kHz verwendet. Die Transducer starteten mit dem Beginn der Abfüllung und schalteten sich anschließend zyklisch mit je einer einsekündigen Pause für zwei Sekunden an.

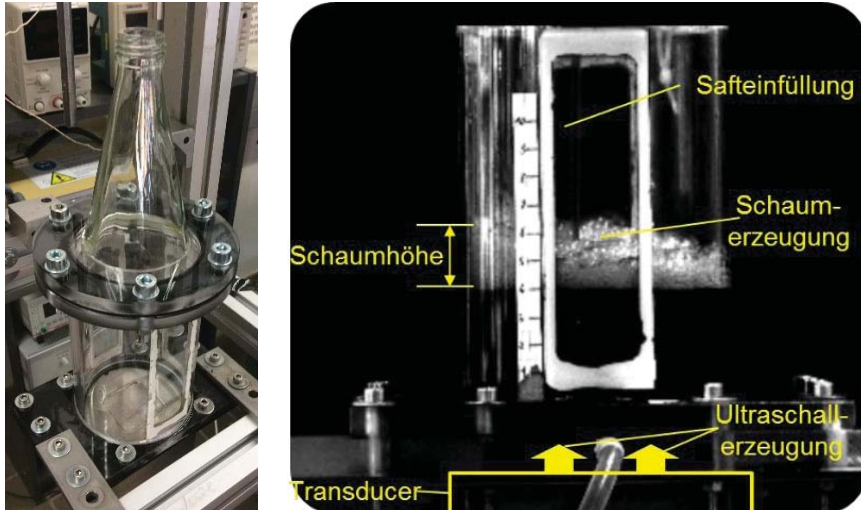


Abbildung 1 Versuchsgefäß (links) und Blickwinkel der Kamera auf das Abfüllgefäßes zur optischen Vermessung der Schaumhöhe (rechts)

Für die Beschallung aus der Luft mit einer 35 kHz Stabsonotrode wurde auf die Hälfte des Flaschenbehälters befüllt, sodass der Aktor 15 mm über dem Flüssigkeitspegel ist. Des Weiteren war noch von Interesse, ob bei diesem Abstand eine weitere Schaumbildung verhindert werden kann. Dahingehend wurde der Saft, nach Erreichen des Füllstands, vom Ablauf des Gefäßes abgezogen und im Kreislauf gepumpt, sodass die fortlaufende Befüllung auf einem konstanten Pegel gehalten werden konnte.

Ergebnisse und Diskussion

Ziel der Versuche war es, über verschiedene Wege den Ultraschall in den Schaum einzubringen, um möglichst große Effekte zu erzeugen.

Beschallung vom Boden

Bei den Versuchen mit Ananassaft und einer Beschallung von unten wurden schaumhemmende Effekte durch Ultraschall erkennbar. Dabei lässt sich aus Abbildung 2 ablesen, dass bei einem Einsatz von Ultraschall der Schaum vergleichsweise niedriger ist. Die größten Unterschiede sind in der Anfangsphase zu beobachten, in der der Füllstand in der Flasche noch sehr gering war und der Freistrahler noch eine hohe Aufprallgeschwindigkeit besaß. In dieser Phase bildete sich ebenfalls der meiste Schaum, der jedoch bei den Versuchen mit Ultraschall wesentlich geringer war, als bei den Durchläufen ohne Ultraschall. Zusätzlich ließ sich beobachten, dass die Wahl der Leistung ebenfalls einen Einfluss auf die Schaumhöhe hatte. So wurden die besten Ergebnisse mit 50% der Amplitude des 50 W Transducers erreicht, die einen Höhenunterschied zu den Referenzläufen bis zu 9 mm bei einem Füllstand von 20 mm erzielten. Dieser Unterschied zwischen beiden Versuchsläufen verringerte sich jedoch mit steigendem Füllstand, sodass die Schaumhöhen am besten bei 50 % Leistung nur um 3 mm bei einem Pegelstand von 60 mm verringert und danach keinen Unterschied mehr detektiert werden konnte.

Für das bessere Abschneiden der geringeren Leistung gegenüber der vollen Leistung können zwei Nebeneffekte des Ultraschalls in Betracht gezogen werden. Zum einen entbindet der Ultraschall ab einer gewissen Intensität gelöste Gase in Flüssigkeiten, zum anderen kann der Ultraschall bei dünnen Flüssigkeitsfilmen derart die Oberfläche ins Schwingen bringen, dass Luft in die Flüssigkeit eingezogen werden kann. Diese Effekte spielen allerdings nur zu Beginn des Abfüllens eine Rolle, wodurch nur der starke Anstieg bei einer Leistung von 100 % erklärt

werden kann. Ab einer Füllhöhe von 60 mm bleibt einzig die Schaumhöhe unter voller Leistung des Ultraschalls niedriger, als bei den anderen Versuchsläufen. Es ist davon auszugehen, dass ab dieser Höhe die Distanz zwischen Aktor und der Oberfläche zu groß sind, wodurch kaum mehr Schaum zerstört wird.

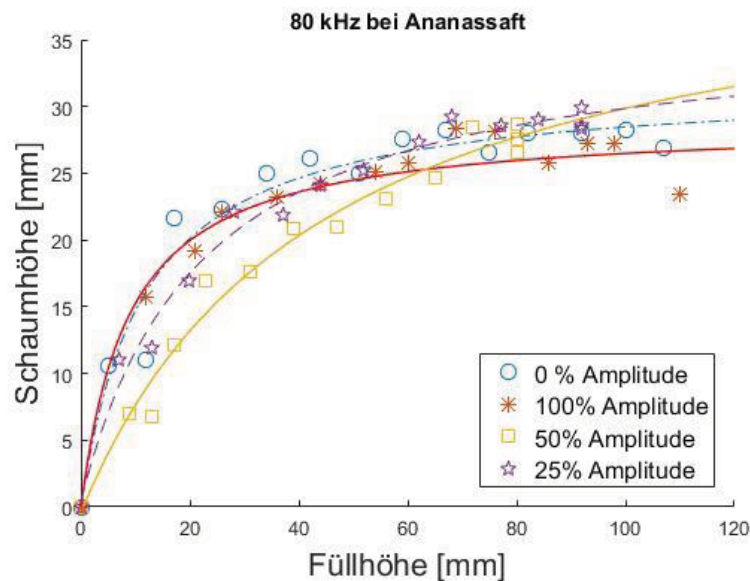


Abbildung 2 Schaumhöhenverlauf gegenüber den ansteigenden Flüssigkeitspegel von Ananas während der Beschallung mit 80 kHz

Das Versuchsgefäß erlaubte durch die Sichtfenster eine gute Beobachtung der Schaumbildung. Allerdings können, bedingt durch die bloße optische Observation von außen, bislang keine weiteren strömungsmesstechnische Untersuchungen gemacht werden, da die bisher verwendeten Säfte und deren Schäume eine zu hohe Lichtstreuung besitzen.

Beschallung aus der Luft

Größere Effekte auf den Schaumzerfall besaß jedoch der Einsatz aus der Luft mit der Stabsonotrode. Durch Erhöhen der Leistung konnte der Abstand zwischen Aktor und Schaum vergrößert werden, in dem der Schaum direkt zerstört wurde. Aus Abbildung 3 zeigt die zeitliche Schaumhöhenveränderung bei konstanter Einfüllung und konstantem Füllpegel. An der Kurve des Referenzversuchs ohne Ultraschall ist zu erkennen, dass sich auf dieser Pegelhöhe weiterhin Schaum bis zu einer Höhe von 25 mm bilden konnte. Danach stellte sich ein Gleichgewicht ein, bei dem es zu keinem weiteren Wachstum der Schichtdicke kam. Durch Anschalten des Ultraschallaktors sank, sowohl bei 50 %, als auch bei 75 %, hingegen im Schnitt die Schaumhöhe von etwa 17 mm auf 11 mm und bildete einem Abstand von etwa 5 mm. Bei einer Leistung von 200 W (100 %) bildete sich eine Lücke zwischen Schaum und Sonotrode von 10 mm, wodurch die Schaumdecke auf 5 mm dezimiert wurde.

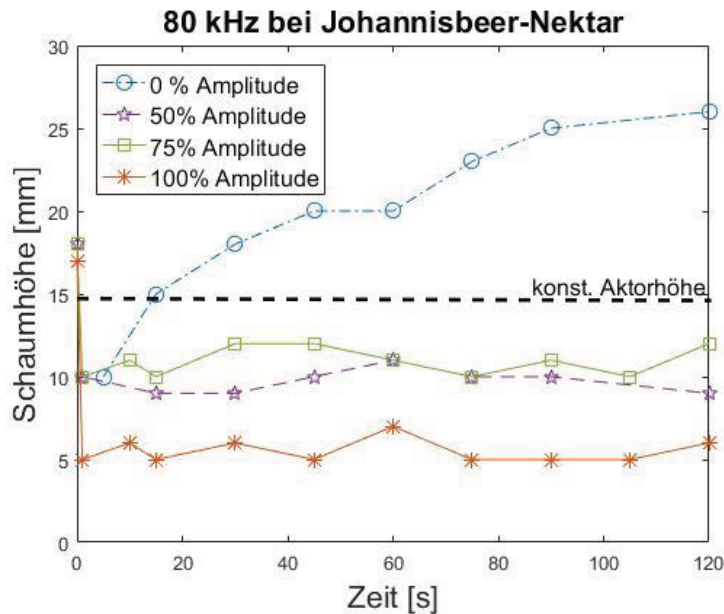


Abbildung 3 Zeitlicher Verlauf der Schaumhöhen bei konstantem Flüssigkeitspegel für Johannisbeer-Nektar durch Ultraschall mit 35 kHz über die Luft

Deutlichere Unterschiede zwischen dem sporadischen und forcierten Schaumzerfall wurden bei der Beschallung von Ananassaft sichtbar (siehe Abbildung 4). Aufgrund des sehr starken Zusammenfallens des Schaums, wurde der Aktor auf 35 mm oberhalb des Flüssigkeitspegels verschoben. Vor dem Anschalten des Ultraschall-Aktors erreichte der Schaum eine Höhe von 27-30 mm. Dieser zerfiel ebenfalls -wie beim Johannisbeer-Necktar- innerhalb einer Sekunde um 15 mm bei 50 % der Amplitude, um 20 mm bei 75 % der Amplitude und um 23 mm bei ganzer Amplitude. In allen drei Fällen regenerierte sich die Schaumhöhe jedoch um etwa 2 mm während der weiteren Beschallung, da große Blasen bereits zerplatzten und resistenterere, kleine Blasen übrig blieben. Als Folge dessen wurde der Schaum feinporiger und schlechter zerstörbar.

Bei beiden Säften, Ananas-Saft und Johannisbeer-Nektar, war eine deutliche Reduzierung der Schaumhöhen zu beobachten. Dabei war zu beobachten, dass zunächst größere Blasen tendenziell als erste zerplatzten und zuletzt – und mit einem deutlich höheren akustischen Aufwand- die kleineren Blasen folgten. Ananas-Saft besaß eine höhere Schaumfähigkeit, als Johannisbeer-Nektar. Allerdings wurde bei Ananas der Schaum wesentlich schneller grobporiger und angreifbarer für den Ultraschall. Einen großen Einfluss auf den Abstand zwischen Aktor und Schaumdecke spielte zudem die Leistung des Aktors. Es konnte bei beiden Säften gezeigt werden, dass mit der Erhöhung der akustischen Amplitude auch der Abstand wächst.

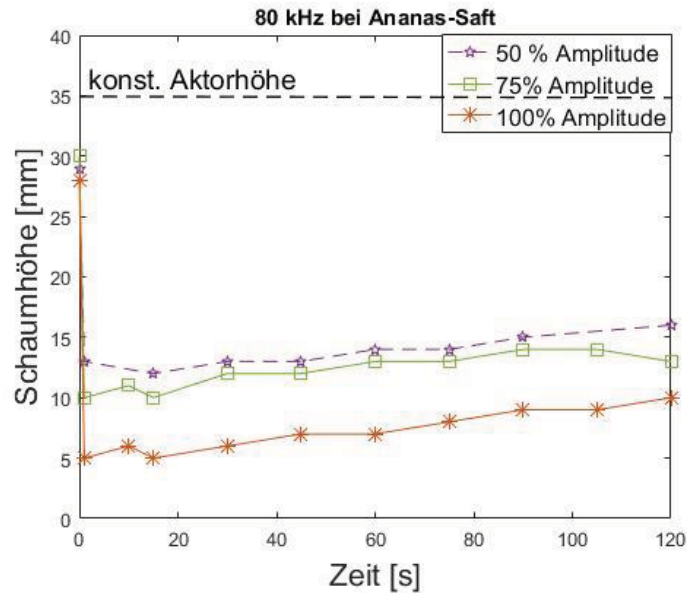


Abbildung 4 Schaumreduktion bei Ananassaft durch Ultraschall mit 35 kHz über die Luft

Zu erwartenden Eigenfrequenzen der Blasen bei unterschiedlichen Säften und Temperaturen

Für die theoretische Berechnung der Eigenfrequenzen für die Schaumbblasen wurden die Dichten, Oberflächenspannung und Viskositäten der verwendeten Säfte vermessen und in die Rayleigh-Plesset-Gleichung (siehe Gleichung 1) eingesetzt. Aus Abbildung 2 wird ersichtlich, dass im kleineren Blasenradiusbereich die Eigenfrequenzen mit zunehmenden Radius stark abfallen. Dieser Abfall wird jedoch im weiteren Verlauf geringer, woraus sich erkennen lässt, dass sich dann die Eigenfrequenz im Vergleich zum Blasenradius weniger verändert.

Zusätzlich können hier Ober- und Untergrenzen für die Frequenzwahl im Hinblick auf die reine Resonanzanregung abgeleitet werden. Wie aus den Grafiken zu sehen ist, nimmt die Eigenfrequenz mit zunehmenden Blasenradius ab. Laut Definition liegt die niedrigste Ultraschallfrequenz bei 20 kHz an der Schwelle zum hörbaren Bereich. Daher werden Blasengrößen theoretisch nur bis 180 μm Radius durch Ultraschall zur Resonanz gebracht. Ebenfalls wird die Höhe der zu verwendenden Frequenz bei etwa 120 kHz angenommen.

Darüberhinaus lässt sich aus den Graphen erkennen, dass der Unterschied der Kurvenverläufe von Fruchtsaft zu Fruchtsaft ebenfalls nicht stark ausgeprägt ist. So können selbst bei Hinzunahme von Orangen- oder Rhabarbarsaft, die rein als Rechenbeispiel dienen, kaum Unterschiede festgestellt werden. Lediglich ein leichter Temperatureinfluss auf die Kurvenverläufe lässt sich erkennen. Dabei sinken die Eigenfrequenzen bei 85 °C etwas im Vergleich zu den äquivalenten Blasengrößen bei 20 °C. Daraus ist für die Versuche zu erwarten, dass die Temperatur oder die reinen Stoffdaten der Säfte einen geringeren Einfluss, als die Blasengrößenverteilung auf die Frequenzwahl besitzen.

Die errechneten Resonanzfrequenzen können jedoch zunächst als eine grobe Prognose für ein mögliches Frequenzspektrum zur speziellen Resonanzanregung der Schaumbblasen gesehen werden, da die Rayleigh-Plesset-Gleichung für freie Blasen in einer Flüssigkeit aufgestellt wurde und nicht speziell für Blasen in Schäumen steht. Zudem sind die von Sandor und Stein (Sandor und Stein, 1993) genannten Effekte des Ultraschalls auf die Lamellenbewegung ebenfalls für den Schaumzerfall in Betracht zu ziehen, welche vermutlich

auch frequenzabhängig sein können. Diese Beziehung wurde bisher aber noch nicht in der Literatur näher betrachtet und müsste dahingehend untersucht werden.

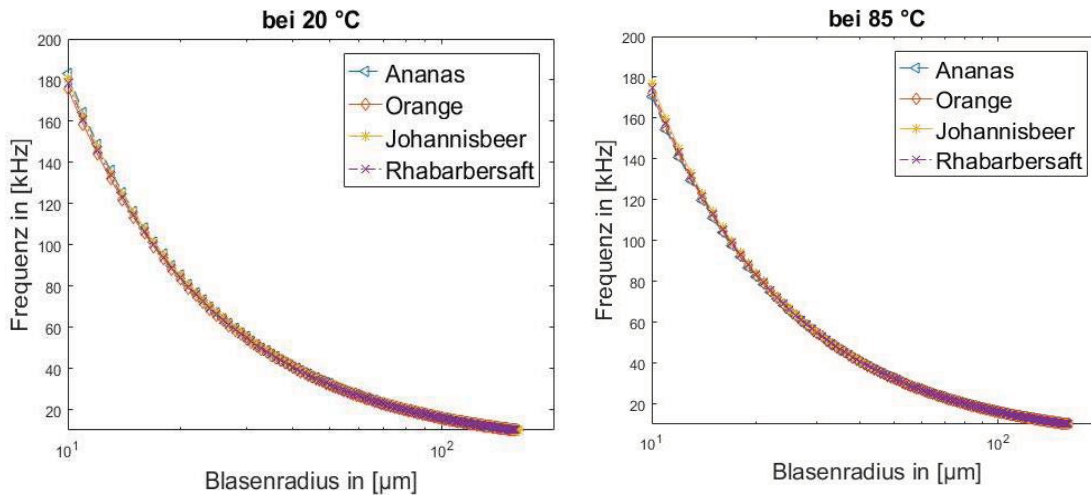


Abbildung 5 radiusabhängige Eigenfrequenzen von Blasen in verschiedenen Säften nach der Rayleigh-Plesset-Gleichung

Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigten bei den Entschäumungsversuchen mit der 35 kHz Stabsonotrode aus der Luft verschiedene Effekte des Ultraschalls. Zu Beginn der ersten Beschallung waren zunächst mit stark vibrierende Lamellen an der offenen Schaumdecke zu beobachten. Hierzu visualisieren die weißen Pfeile in Abbildung 6 die Eindringtiefe des Schalls, bei dem noch eine Lamellenbewegung festzustellen war. Begleitet wurden die starken Vibrationen mit einem Flüssigkeitsauswurf (weißes Rechteck), der mit der Intensität des Schalls und gleichzeitig mit den Lamellenvibrationen zu-, bzw. abnahmen (vergleiche Abb. 6 a). Bei einer erneuten Beschallung formierte sich derselbe Schaum soweit um, dass die Lamellenbewegungen und der Flüssigkeitsauswurf schwächer wurden. Dagegen nahm die Eindringtiefe zu (vergleiche Abb. 6 b). Diese Veränderung führte sich bei einer weiteren Beschallung fort, bis der Schaum nicht weiter kollabierte und keine Tröpfchen ausgeworfen wurden (vergleiche Abb. 6 c).

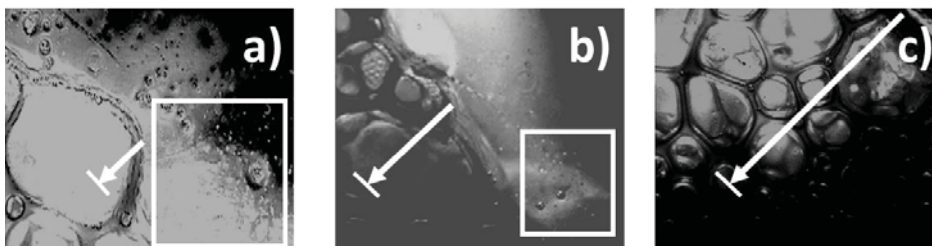


Abbildung 6 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von Johannisbeer-Nektar zu Beginn der ersten Beschallung (a), zweiten Beschallung (b) und dritten Beschallung (c) mit 35 kHz aus der Luft.

Aus den Aufnahmen lassen sich die von Sandor und Stein (Sandor und Stein, 1993) angenommenen Lamellenvibrationen erkennen. Allerdings wurden diese auch von einem Flüssigkeitsauswurf begleitet, sodass in diesen Versuchen nicht direkt auf eine Drainageerhöhung schlussgefolgert werden kann. Blasenresonanzen konnten in den Versuchen festgestellt werden. Allerdings konnten sie aufgrund der nicht gesteuerten Blasengrößenverteilung, der spontanen Lage der potentiell resonierenden Blasen im Schallfeld und der fehlenden Frequenzmodulation der Stabsonotrode nicht gezielt im Schaum angeregt werden. Nichtsdestotrotz legen die Aufnahmen die Vibrationen der Lamellen und die

Veränderung der Flüssigkeitsauswurftrate und der Eindringtiefe über die Dauer der Beschallung dar.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag stand der Einfluss von Hochleistungs-Ultraschall auf die Entschäumung von Fruchtsäften im Fokus. Dazu wurden exemplarisch Johannisbeer-Nektar und Ananas-Saft verwendet. Aus den theoretischen Berechnungen, die auf realen Stoffdaten basieren, wurde ersichtlich, dass sich die größenspezifischen Eigenfrequenzen kaum von den Fruchtsäften untereinander unterscheiden. Vielmehr ist die Blasengrößenverteilung ein größerer Faktor für die Effektivität des Ultraschalls. Diese Beobachtung wird ebenfalls durch die Versuche mit der 35 kHz Sonotrode und denen mit der Hochgeschwindigkeitskamera gestützt.

Bei einer Beschallung über den Boden durch die Flüssigkeit wurden niedrigere Schäume bei geringeren Leistungen der Aktoren erreicht. Es wurde beobachtet, dass der Schall zum einen die Schaumbildung in seiner frühen Phase der Abfüllung verminderte und zum anderen bei höheren Leistungen die Schaumhemmung wieder abnahm. Eine Vermutung ist die Beeinflussung des Blasenaufstiegs durch den Ultraschall, der bei einer zu starken Einbringung zur Entgasung des Safts führen kann. Messungen mit PIV könnten dazu Informationen über die Strömungsverhältnisse um den Freistrahл bringen.

Dankesworte

Dieses IGF-Projekt der FEI wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Kollektivforschung (IGF) des Bundesministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und Energie (BMWi) unterstützt. Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung und danken Christopher McHardy (LBPT, TU Berlin) für die Messungen der Saftproben.

Literatur

- CANTAT, I., S. COHEN-ADDAD, F. ELIAS, F. GRANER, R. HÖHLER, O. PITOIS, F. ROUYER UND A. SAINT-JALMES, 2013: Foams: structure and dynamics, OUP Oxford.
- Cohen-Addad, S., R. Höhler, O. Pitois, 2013: Flow in foams and flowing foams. Annual Review of Fluid Mechanics 45, 241–267.
- Gallego-Juárez, J.A., G. Rodríguez, E. Riera, A. Cardoni, 2015: 26 - Ultrasonic defoaming and debubbling in food processing and other applications. In: *Power Ultrasonics*. GALLEGO-JUÁREZ, J.A. UND K.F. GRAFF (Hrsg.), Oxford, Woodhead Publishing, S. 793–814.
- Koehler, S.A., H.A. Stone, M.P. Brenner, J. Eggers, 1998: Dynamics of foam drainage. Physical Review E 58 (2), 2097.
- Leighton, T.G., 2007: Derivation of the Rayleigh-Plesset equation in terms of volume.
- Leroy, V., Y. Fan, A.L. Strybulevych, G.G. Bellido, J.H. Page, M.G. Scanlon, 2008: Investigating the bubble size distribution in dough using ultrasound. In: *Bubbles in food 2*, Elsevier, S. 51–60.
- Leroy, V., A. Strybulevych, M.G. Scanlon, J.H. Page, 2009: Transmission of ultrasound through a single layer of bubbles. The European Physical Journal E 29 (1), 123–130, DOI:10.1140/epje/i2009-10457-y.
- Medwin, H., 1977: Acoustical determinations of bubble-size spectra. The Journal of the Acoustical Society of America 62 (4), 1041–1044.
- Morey, M.D., N.S. Deshpande, M. Barigou, 1999: Foam Destabilization by Mechanical and Ultrasonic Vibrations. Journal of Colloid and Interface Science 219 (1), 90–98, DOI:10.1006/jcis.1999.6451.
- Sandor, N., H.N. Stein, 1993: Foam Destruction by Ultrasonic Vibrations. Journal of Colloid and Interface Science 161 (1), 265–267, DOI:10.1006/jcis.1993.1465.
- Vaidya, H.A., Ö. Ertunç, T. Lichtenegger, A. Delgado, A. Skupin, 2016: The penetration of acoustic cavitation bubbles into micrometer-scale cavities. Ultrasonics 67, 190–198.