Zerstörung von unerwünschten Schäumen in thermischen

Prozessen mit eigenresonanten Ultraschall

Destruction of unwanted foams in thermal processes with resonant ultrasound

Julian Thünnesen¹, Bernhard Gatternig^{1,2,3}, Antonio Delgado^{1,2}

¹Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Germany.

²LSTME, German Engineering Research and Development Center, Busan, Republic of Korea

³Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Verfahrenstechnik und Kreislaufwirtschaft, Merkendorf, Germany

Schlagworte: Ultraschall, Resonanz, Schaum, Kochung, Drainage, Schaumzerstürung Key words: ultrasound, resonance, foam, boiling, drainage, defoaming

Zusammenfassung

Unerwünschte Schäume sind eine der häufigsten Ursachen für den Ausfall von flüssiggasförmigen Prozessen von Chemikalien, Lebensmitteln, Getränken und Wasser. Insbesondere Siedeprozesse schaumempfindlicher Flüssigkeiten neigen im Allgemeinen dazu, schnell überzuschäumen. Ein adäquates Management von Schäumen ist nach wie vor aus wissenschaftlicher, wie technischer Sicht herausfordernd. Neben der Vermeidung sollte es auch Wege der aktiven Zerstörung für eine Schaumkontrolle geben.

Ziel der Forschung ist es, unerwünschte Schäume umweltfreundlich und rein mechanisch zu vermeiden und zu zerstören. Hierfür verspricht die Beschallung mit Ultraschall gute Erfolge. Der Beitrag stellt Schaumereignisse bei Siede- und Destillationsprozessen in einer Pilotanlage (D=400 mm) vor. Im Gegensatz zu Ultraschallsystemen mit Beschallung aus der Luft wird in diesem Beitrag der Ultraschall über die Flüssigkeit eingebracht. Dadurch erreichen die Wellen den Schaum verlustfreier und bilden aufgrund von Resonanzeffekten mit den Blasen Oberflächenwellen entlang der Phasengrenzflächen aus. In den Versuchen wurde als Folge dessen eine erhöhte Drainage und eine raschere Vergröberung des Schaums beobachtet. Der gröbere und trockenere Schaum zerfällt schließlich schneller oder kann durch andere mechanische Zerstörungsmethoden, wie die Eigenberieselung, besser abgebaut werden.

Der Beitrag schließt mit einem Ausblick, wie die Aktuatoren für ein wissensbasiertes Schaummanagement eingesetzt werden können.

Einleitung

Schäume sind disperse Systeme die zum einen aus einer gasförmigen, dispersen Phase und einer flüssigen Phase bestehen. Im Gegensatz zu reinen Blasendispersionen in einer Flüssigkeit, überwiegt der volumetrische Anteil der Gasphase bei Schäumen. Dementsprechend können relativ große Volumina mit wenig Flüssigkeitsaufwand durch Schäume eingenommen werden. Für die Industrie wird dies zum Problem, wenn vorgesehene Kopf- oder Steigräume nicht mehr ausreichen und das aufgeschäumte Fluid ungewollt in andere Bereiche der Anlagen, beispielsweise in Kolonnenböden oder geordnete Packungen, gelangt. Als Folge dessen muss der Prozess reduziert oder ganz abgebrochen werden. Die auftretende Schaumhöhe resultiert aus dem dynamischen, höhenabhängigen Gleichgewicht aus schaumbildenden und schaumzerfallenden Effekten [1]. Um die Schaumhöhe zu reduzieren, sollte dementsprechend die Zerfallseffekte wie die Drainage oder Koaleszenz, verstärkt werden. Speziell der physikalischen Schaumzerstörung durch Ultraschall wird eine Erhöhung der Drainage zugesprochen [2-5]. Hierbei zeigte Martin et al. [3], dass eine Beschallung unterhalb des Schaums den Flüssigkeitsabfluss verstärkt. Allerdings blieb eine frequenzabhängige Optimierung für eine resonanzgetriebene Drainage noch offen.

Die Beschallung mit jeweils einer Frequenz zwischen 20-43 kHz über die Luft zeigte zwar deutlichere Effekte in der Schaumreduktion, allerdings wird die Flüssigkeit der zerfallenen Lamellen von den darunterliegenden Plateau-Bereichen aufgefangen, wodurch der Schaum nicht direkt an Flüssigkeit verliert [1]. Aufgrunddessen sind danach wesentlich höhere Schallleistungen von >170 dB nötig, um unabhängig von Resonanzeffekten Flüssigkeit aus den Lamellen in die Luft zu streuen [1, 6, 7].

Der Ansatz dieser Arbeit ist es, die Drainage mit eigenresonanten Ultraschall zu erhöhen. Die Beschallung erfolgt über die Flüssigkeit, da mehr feinere Blasen mit Durchmesser < 5 mm vorliegen, die durch das reziproke Verhältnis von Resonanzfrequenz zu Blasendurchmesser im Ultraschallbereich angeregt werden und oszillieren [8][9]. Die Oszillation erzeugt Oberflächenwellen entlang der Blase, die die Drainage begünstigen sollen. Zudem wird sich der Effekt zu Nutze gemacht, dass größere freie Blasen durch ihre gegenseitige Lage im akustischen Feld ebenfalls oberhalb der Minnaert-Frequenz oszillieren [10]. Durch die Verwendung eines Frequenzsweeps zwischen 25-170 kHz wird zudem die Bandbreite an resonanten Blasengrößen erhöht [11, 12].

Material und Methoden

Für die Untersuchungen wurde eine rechteckige Kolonne (d=100 mm) und ein zylindrokonischer Behälter (folgend bezeichnet: Demonstrator) (d=400 mm) mit Mantelheizung verwendet. Die Versuche in der kleinen Kolonne dienten der Untersuchung der Interaktionen zwischen Ultraschall und Schaumsystemen, während im Demonstrator die Einbringung des Ultraschalls begutachtet wurde.

Kleine Kolonne

Die Kolonne (BxLxH: 100x100x400 mm) ist mit vier Heizpatronen in der Bodenplatte mit einer Gesamtleistung von 400 W ausgestattet, die stufenlos regelbar sind. Zudem sind Thermoelemente (Typ K) jeweils in den Patronen, in der Flüssigkeit und im Kopfraum angebracht. In der Flüssigkeit wurde 80 mm über der Heizplatte und in der Luft auf einer Höhe von 250 mm über dem Boden gemessen. Für die Versuche werden 1,5 I der zu kochenden Flüssigkeit eingefüllt, sodass der Füllstand auf Höhe des Transducers ist.



Abbildung 1 kleine Kolonne mit 25 kHz Transducer

Schaumbildung wird über die Heizleistung eingestellt (in 25 W/I Schritten ausgehend) und die Schaumhöhe im Gleichgewicht betrachtet. Nachdem sich ein Gleichgewicht eingestellt hat und dieses sich nicht für 20 min verändert, folgen die Beschallungen mit zunehmender Leistung (10, 20, 30 und 40 W) jeweils für 4 min. Die Schaumhöhen werden jeweils zum Ende der Beschallungszeit abgelesen. Nach der Beschallung der letzten Stufe, wird die Heizleistung erhöht und gewartet, bis sich ein neues Gleichgewicht nach 20 min einstellt.

Die Schallfrequenzen werden über einen Sweep zwischen 25 kHz bis 180 kHz mit einer Periode von 500 µs zyklisch erzeugt (siehe Abbildung 2). Zur Verwendung kam ein Langevin-Transducer mit einer Grundfrequenz von 25 kHz. Dieser wurde über einen Frequenzgenerator und einem Spannungsverstärker (1020L, E&I) angeregt.



Abbildung 2 Bereich des Frequenzsweeps von 25 -170 kHz (roter Bereich) über die Arbeitsfrequenzen des Langevin-Transducers

In der Kolonne wurde dieser über eine Stahlplatte auf eine Höhe von 120 mm von der Seite angebracht.

Zylindrokonischer Behälter (Demonstrator)

Der Demonstrator ist über eine Mantelheizung (20 kW, $\vartheta_{max}=130$ °C) in sechs Höhensegmenten unabhängig temperierbar. Zudem verfügt der Demonstrator eine Druckluftfritte (130 l/h) Aufschäumung mit Druckluft. Über eine Höhe von 1300 mm sind 2x7 Sichtfenster-Inlays (d=40 mm) angebracht, die zum einen normal und zum anderen tangential zur Wand ausgerichtet sind. Für die Beschallung können diese Inlays mit zwei 40 kHz Langevin-Transducer ausgetauscht werden, die in Edelstahl-Zylindern mit denselben Bemaßungen eingefasst sind. Die Anbringungshöhe der Transducer dabei im Konus und etwa 30 mm unterhalb des Flüssigkeitsspiegels. Die Leistung, Frequenzsweep und Sweep-Dauer sind identisch zu denen der kleinen Kolonne.





Abbildung 3 Skizze des 40 kHz Langevin-Transducers im Edelstahltubus Abbildung 4 Frontalsicht des zylindrokonischen Behälters mit Sichtfenstern

Materialien

Für die Versuche wurden Bierwürze aus Malzextrakt (Bavarian Pilsner, Weyermann, Bamberg) und Roggenmaische (Universität Hohenheim) verwendet. Die physikalischen Eigenschaften bei 20 °C sind in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 1 Dichte, dynamische Viskosität und Oberflächenspannung von Bierwürze und Roggenmaische

	Dichte [kg/m ³]	dyn. Viskosität [Pas]	Oberflächenspannung [mN/m]
Bierwürze	1035	2.19*10 ⁻³	44.19
Roggenmaische	1000	3895	41.76

Statistische Auswertung

Die dargestellten Ergebnisse sind Mittelwerte aus einer Dreifachbestimmung, deren Fehlerbalken aus dem Standardfehler berechnet sind. Eine zweifaktorielle ANOVA zum Einfluss der Zeit und der Heizleistung ohne eine Beschallung wurde über Excel 2016 berechnet. Dazu wurden vor jeder Beschallung für 20 Minuten in 4-minütigen Abständen an drei Seiten der Kolonne die Schaumhöhe gemessen.

Ergebnisse

Erhöhte Drainage und geringer resultierende Schaumhöhe

In der kleinen Schaumkolonne wird ein thermisches Schaumsystem erzeugt, dessen resultierende Höhe unter Siedebedingungen von der eingesetzten Heizleistung abhängt. Dabei ist eine minimale Heizleistung für eine stabile Schaumbildung nötig, damit genügend Schaumblasen an die Oberfläche steigen und die Schaumdecke aufrechtzuerhalten. Bei Bierwürze liegt der Schwellwert bei 197 W/I, während bei der wesentlich viskoseren Roggenmaische der erste Schaum schon bei etwa 150 W/I entsteht. Mit steigender Heizleistung sammeln sich mehr Blasen an, die durch nachkommende weiter nach oben Abbilduna werden, wodurch die Schaumhöhe wächst (siehe gedrückt 3). Temperaturmessungen zeigen, dass innerhalb der Flüssigkeit und des Schaums 99-100 °C herrschen, während knapp oberhalb des Schaums (ca. 5 mm) in der Luft etwa 95 °C vorliegt. Demnach ist davon auszugehen, dass die Blasen aus Dampf bestehen, die an der kühleren Luft durch Kondensation zusammenfallen. Nach Veränderung der Heizleistung pendelt sich die Schaumhöhe innerhalb von vier Minuten ein und schwankte im Mittel um ±10 mm. Eine Varianzanalyse über einen Betrachtungszeitraum von 20 min zeigte bei allen unbeschallten Schaumhöhen keinen signifikanten Einfluss der Zeit (p-Wert=0.49), weshalb die nachfolgende Schaumreduzierung rein auf die Beschallung zurückzuführen ist. Entgegen den Erwartungen steigt der Schaum in der Roggenmaische nach einer Erhöhung von 250 W/I und in der Bierwürze nach einer Erhöhung von 275 W/I zunächst nicht an. Dieser Nebeneffekt ist damit zu erklären, dass sich koagulierte Proteine und Partikel wegen des zwischenzeitlichen Zerfalls durch die Beschallung an den Seitenwänden ablagerten und nicht mehr den Schaum stabilisieren konnten [13].



Abbildung 5 Erzeugte Schaumhöhe von siedender Bierwürze und Roggenmaische bei 100 °C gegenüber eingebrachter Heizleistung

Mit Einsetzen des Ultraschalls sinkt die resultierende Schaumhöhe innerhalb von vier Minuten ab. Dabei ist ein negativer Trend von Schaumhöhe gegenüber Schallleistung sowohl bei der Bierwürze, als auch bei der Roggenmaische zu sehen (siehe Abbildung 4). Mit Ausnahme der untersten Heizleistung, reduziert sich der Schaum bei Bierwürze, unabhängig von der Ausgangshöhe, von 80 % auf etwa 70 %. Bei der Roggenmaische ist der Effekt der Schallleistung nochmal deutlicher.



Abbildung 6 Zum Nullversuch normalisierte Schaumhöhen von Bierwürze (links) und Roggenmaische (rechts) für Schallleistungen von 10, 20, 30 und 40 W bei unterschiedlichen Heizleistungen

Gleichzeitig sank die Grenze, an der der Schaum sich merkbar vergröbert, das auf eine höhere Drainage hindeutet. Aufgrund dessen wandern nur noch größere Blasen mit dünneren Lamellen nach, die weniger stabil sind (siehe Abbildung 5). Bei den untersten Heizleistungen ist ein sehr feuchter und feinporiger Kugelschaum bei beiden Medien vorhanden. Es ist davon auszugehen, dass durch die Beschallung forcierte Drainage bei diesen Schäumen nochmal deutlicher wirkt, weshalb die Schaumhöhen um über 80 % reduziert wird.



Abbildung 7 Bildung von trockenerem Schaum bei einer Beschallung von Bierwürze mit 30 W und einer Heizleistung von 250 W/I

Der Ultraschall wirkt nur im unteren Grenzbereich des Schaums, da der Schall durch die häufigen Phasengrenzflächen stark reflektiert wird. Dennoch läuft in diesem Bereich des Schaums der Flüssigkeit schneller ab, wodurch Flüssigkeiten aus den oberen Bereich entlang der Erdbeschleunigung nachfließen muss. Die Plateau-Bereiche, die im Schaum als Wasserpuffer dienen, dünnen schneller aus, wodurch nur noch Flüssigkeit in den Lamellen übrigbleibt, die durch den Kapillareffekt zurückgehalten wird [14]. Adsorbierte, oberflächenaktive Stoffe verbleiben ebenfalls in den Lamellen und bilden stützende quasifeststoffartige Gerüste. Zum finalen Schaumkollaps kommt es örtlich, wenn die Drainage soweit fortgeschritten ist, dass die Lamellen ihre kritische Dicke unterschreiten und zerreißen [15]. Dies tritt dann vermehrt durch die schneller ausgetrockneten Lamellen im Einzelnen oder als Konsequenz benachbarter Kollapse.

Ergebnisse Demonstrator

Bei ersten Untersuchungen mit heißer Bierwürze (70 °C) und einer Begasung (130L/h) bildet sich nach 60 min eine stabile Schaumhöhe von 120 ±20 mm. Mit Einsetzen des Ultraschalls bei 40 W und beibehaltender Begasung verschwinden die feinporigen Teile der Schaumschicht nach 16 min komplett. Speziell der Bereich zwischen den zwei Transducern und der aufsteigenden Blasensäule bleibt schaumfrei. Im Vergleich zur partiellen Schaumreduzierung in der kleinen Kolonne lässt sich darauf schließen, dass die Beschallung des Schaums nochmal begünstigt wird, wenn weniger Blasen zwischen Transducer und Schaum in der Flüssigkeit vorliegen, da sich in der kleinen Kolonne die Blasen mehr in der stärkere Vergröberung des Schaums.



Abbildung 8 Schaumzerfall im zylindrokonischen Behälter d=400 mm zu den Zeitpunkten t=0 min, 12 min und 16 min

Zusammenfassung und Ausblick

Sowohl in der Kolonne mit einem Durchmesser von 100 mm, als auch im zylindrokonischen Tank mit einem Durchmesser von 400 mm zeigte eine Beschallung mit einem Frequenz-Sweep zwischen 25-170 kHz und einer elektrischen Gesamtleistung von 40 W eine deutliche Reduzierung der resultierenden Schaumhöhe. Gleichzeitig war eine Vergröberung der Schaumdecke zu beobachten, da speziell kleinere Blasenfraktionen verschwanden. Zum einen verspricht diese Methode eine aktive Schaumkontrolle. Zum anderen kann sie mit anderen physikalischen Schaumzerstörungsverfahren, wie die Beregnung arteigener Flüssigkeit, kombiniert werden, da die Effektivität der Beregnung mit trockeneren Schäumen steigt und auftretende Sekundärschäume vom Ultraschall schneller aufgelöst werden können [15].

Literatur

- M. Barigou, "Foam Rupture by Mechanical and Vibrational Methods", *Chem. Eng. Technol.*, Jg. 24, Nr. 6, S. 659–663, 2001, doi: 10.1002/1521-4125(200106)24:6<659::AID-CEAT659>3.0.CO;2-1.
- [2] N. Sandor und H. N. Stein, "Foam Destruction by Ultrasonic Vibrations", *Journal of Colloid and Interface Science*, Jg. 161, Nr. 1, S. 265–267, 1993, doi: 10.1006/jcis.1993.1465.
- [3] J. B. Winterburn und P. J. Martin, "Mechanisms of ultrasound foam interactions", *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, Jg. 4, Nr. 2, S. 184–190, 2009.
- [4] S. Cohen-Addad, R. Höhler und O. Pitois, "Flow in foams and flowing foams", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Jg. 45, S. 241–267, 2013.
- [5] S. A. Koehler, H. A. Stone, M. P. Brenner und J. Eggers, "Dynamics of foam drainage", *Physical Review E*, Jg. 58, Nr. 2, S. 2097, 1998.
- [6] A. C. Dedhia, P. V. Ambulgekar und A. B. Pandit, "Static foam destruction: role of ultrasound", *Ultrasonics Sonochemistry*, Jg. 11, Nr. 2, S. 67–75, 2004, doi: 10.1016/S1350-4177(03)00134-2.
- J. A. Gallego-Juárez, G. Rodríguez, E. Riera und A. Cardoni, "26 Ultrasonic defoaming and debubbling in food processing and other applications" in *Power Ultrasonics*, J. A. Gallego-Juárez und K. F. Graff, Hg., Oxford: Woodhead Publishing, 2015, S. 793–814, doi: 10.1016/B978-1-78242-028-6.00026-0.
- [8] T. G. Leighton, "Derivation of the Rayleigh-Plesset equation in terms of volume", 2007.
- [9] H. A. Vaidya, Ö. Ertunç, T. Lichtenegger, A. Delgado und A. Skupin, "The penetration of acoustic cavitation bubbles into micrometer-scale cavities", *Ultrasonics*, Jg. 67, S. 190– 198, 2016.
- [10] V. Leroy, A. Strybulevych, M. G. Scanlon und J. H. Page, "Transmission of ultrasound through a single layer of bubbles", *The European Physical Journal E*, Jg. 29, Nr. 1, S. 123–130, 2009, doi: 10.1140/epje/i2009-10457-y.
- [11] H. Medwin, "Acoustical determinations of bubble-size spectra", *The Journal of the Acoustical Society of America*, Jg. 62, Nr. 4, S. 1041–1044, 1977.
- [12] V. Leroy, Y. Fan, A. L. Strybulevych, G. G. Bellido, J. H. Page und M. G. Scanlon, "Investigating the bubble size distribution in dough using ultrasound" in *Bubbles in food* 2, Elsevier, 2008, S. 51–60.
- [13] I. Cantat et al., Foams: structure and dynamics. OUP Oxford, 2013.
- P.-G. de Gennes, "The Physics of FoamsThe Physics of Foams Denis Weaire and Stefan Hutzler Clarendon Press/Oxford U. Press, New York, 1999. \$80.00 (246 pp.).
 ISBN 0-19-850551-5", *Physics Today*, Jg. 54, Nr. 3, S. 54, 2001, doi: 10.1063/1.1366070.
- [15] M. H. Pahl und D. Franke, "Schaum und Schaumzerstörung–ein Überblick", *Chemie Ingenieur Technik*, Jg. 67, Nr. 3, S. 300–312, 1995.