

Literatur- und Internetrecherche zum Themengebiet Schaum

**Ingenieurbüro für angewandte Strömungsmechanik
Hans-W. Mindt und Wolfgang Ottow GbR**

Inhalt

1	Einleitung.....	3
2	Definition von Schaum / Eigenschaften von Schaum.....	4
2.1	Rheologie von Schaum – Untersuchungen zu fließendem Schaum [6].....	5
2.1.1	Kompressibilität.....	5
2.1.2	Schaumstabilität von fließenden Schäumen.....	6
2.1.3	Viskosität von Schaum.....	6
2.1.4	Typisches Verhalten von Schaum.....	6
2.1.5	Typische Werte.....	8
2.1.6	Beurteilung von Schaumuntersuchungen.....	8
2.1.7	Schaumströmung in einem Rohr.....	9
2.1.8	Schaumströmung durch eine Einschnürung.....	9
2.1.9	Zusammenfassung zur Rheologie von Schaum.....	10
2.2	Einfluß von oberflächenaktiven Zusatzstoffen.....	11
3	Kennzeichende Größen.....	12
3.1	Gasanteil.....	12
3.2	Zumischung.....	12
3.3	Wasserhalbzeit.....	12
3.4	Grenzfläche.....	12
3.5	Mittleres Schaumvolumen V_s	13
3.6	Oberflächenviskosität.....	13
3.7	Oberflächenelastizität.....	13
4	Entstehung von Schaum.....	14
4.1	Schaumbildung in Blasensäulen.....	15
5	Schaumvermeidung.....	15
6	Grundlagen und Methoden der mechanischen Schaumzerstörung.....	16
7	Schaumbildung beim Befüllen von Flaschen.....	20
8	Methoden des Schaumtestens.....	21
9	Vergleichsmöglichkeiten mit der Literatur.....	22

1 Einleitung

Dieser Bericht stellt eine Zusammenstellung von Textstellen verschiedener Artikel, die sich generell mit dem Thema Schaum befassen, dar. Hierfür wurden zahlreiche Berichte mit Blick auf die Strömungssimulation von Schäumen die in Strömungsmaschinen vorkommen.

Der Autor dieses Berichtes konnte bei seiner Recherche keinerlei Literatur bezüglich der Simulation von Schaum ermitteln. Im wesentlichen beschäftigt sich dieser Bericht mit den Fragen „Was ist Schaum und wie entsteht er?“, „Wie wird Schaum vermieden?“ und „Wie kann Schaum ohne Einsatz von Zusatzmitteln und thermischer Verfahren zerstört werden?“.

2 Definition von Schaum / Eigenschaften von Schaum

Mit Schaum bezeichnet man ein disperses System aus Gas und Flüssigkeit bzw. Gas und Feststoff, wobei der Volumenanteil der Gasphase überwiegt. Gibt man der reinen Flüssigkeit einen grenzflächenaktiven Stoff (Tensid) zu, dann reichert sich dieser in der Grenzfläche an, da die Tenside einen ambiphilen Molekulaufbau besitzen. Der hydrophile Molekülteil taucht in die polare Flüssigkeitsphase und der hydrophobe Teil in die Gasphase. Die Länge der Tensidmoleküle beträgt je nach Anzahl der Kohlenwasserstoffglieder ca. 2-4nm. Bei hohen Tensidkonzentrationen bilden sich sogenannte Mizellen. Steigt in der Tensidlösung eine Gasblase auf, umgibt sie sich zunächst mit einer Adsorptionsschicht und beim Durchstoßen der Flüssigkeitsoberfläche mit einer zweiten (s. Abbildung 1). Dadurch entstehen stabile Blasen, die bald die gesamte Phasengrenze bedecken und schließlich einen Kugelschaum bilden.

Abbildung 1:
Entstehung von Schaumbblasen [7]

Schon nach einigen Blasenschichten verringert sich der Flüssigkeitsanteil im Blasensystem infolge der schwerkraftbedingten Drainage, und die Blasen aggregieren zu einem Polyederschaum-System (s. Abbildung 2). [2]

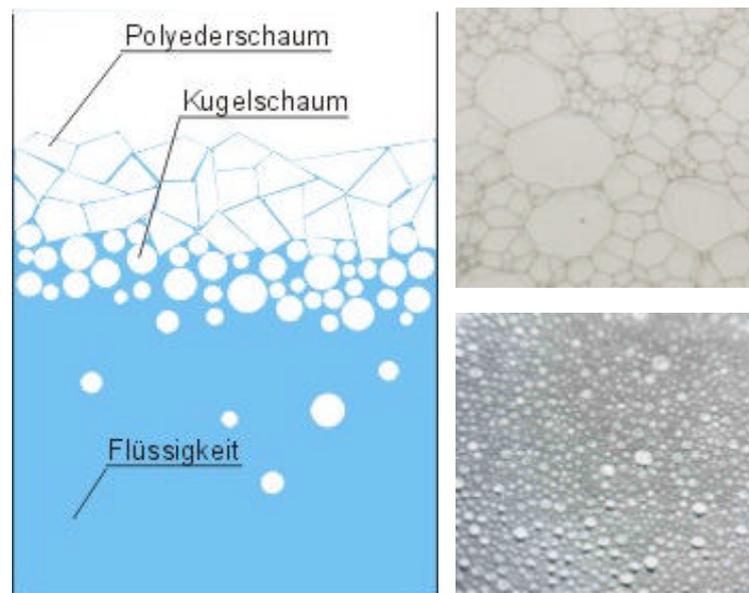


Abbildung 2: Kugelschaum vs. Polyederschaum [7]

Kugel- oder nasser Schaum besteht somit aus vielen Einzelblasen in Form von Kugeln, zwischen denen sich viel Flüssigkeit befindet. Hingegen ist beim Polyeder- bzw. trockenen Schaum bereits Flüssigkeit aus den Lamellen geflossen, so dass die Einzelblasen immer näher aneinander rücken und sich zu Polyedern verformen. Bei einer schäumenden Flüssigkeit treten in der Regel beide Arten auf, wobei sich der Polyederschaum oberhalb des Kugelschaumes befindet. [7]

Innerhalb des Kugelschaums ist die Volumenkonzentration des Gases kleiner als 74%. Die sehr instabilen Blasen des Kugelschaums verändern ihre Form beim Zusammenstoß mit anderen Blasen. Es entstehen Polyeder verschiedener Flächenform und Größe. Die einzelnen Gasblasen werden von einer doppelwandigen Schaumlamelle umschlossen. Dieses Häutchen ist ca. 4-600 nm dünn. Das Innere der Doppelwand ist mit Flüssigkeit ausgefüllt. Der entstandene polyederförmige Schaum ist wesentlich stabiler. Damit die Blase durch den Normaldruck nicht zusammenfällt, herrscht in der Blase gegenüber der Umgebung ein Überdruck. [8]

Die Blasengröße bei feinen Schäumen liegt bei 0,1 bis 2,0 mm. Die Blasen von groben Schäumen können bis zu 10 mal größer sein. Das Volumen des Schaumes hängt u.a. vom Flüssigkeitsvolumen, den mechanischen Bedingungen und der Temperatur ab. [8]

Im Falle einer Blasensäule beträgt der Zeitraum, in dem sich eine stetige Schaumhöhe einstellt, je nach Geschwindigkeit von Gas bzw. Flüssigkeit, etwa 30 bis 60 Minuten.

Die Grenzfläche zwischen Schaum und Flüssigkeit beschreibt einen Phasenwechsel zwischen zwei Zweiphasenströmungen. Die sprudelnde Flüssigkeit ist eine Zweiphasenströmung von Gas und Tensiden in Wasser, der Schaum ist ebenfalls eine Zweiphasenströmung von Gas und Tensiden in Wasser, wobei im Schaum der Gasanteil deutlich höher liegt. [5]

2.1 Rheologie von Schaum – Untersuchungen zu fließendem Schaum [6]

2.1.1 Kompressibilität

Schaum besteht im allgemeinen aus 70 – 99 % Luft. Daher besitzt Schaum, ebenso wie Luft, kompressible Eigenschaften. Die im Vergleich zur Luft höhere Dichte des Schaums führt dazu, dass diese kompressiblen Eigenschaften bei erheblich niedrigeren Geschwindigkeiten auftreten. Grobe Berechnungen ergeben, dass die Schallgeschwindigkeit in Schaum unter bestimmten Bedingungen niedriger als 24 m/s sein kann. In Luft bzw. Wasser liegt sie allerdings bei 332 m/s bzw. 1450 m/s.

Zwei weitere kompressible Effekte neben der unterschiedlichen Schallgeschwindigkeit können auftreten. Der erste Effekt, der auch in stationären Schäumen auftritt, ist, dass die Oberflächenspannung den Druck in kleinen Blasen im Vergleich zu größeren Blasen erhöht. Das führt dazu, dass Gas aus kleinen Blasen in größere diffundiert. Dieser Effekt kann allerdings im Vergleich zu anderen Phänomenen vernachlässigt werden. Der andere Effekt ist, dass die Art eines Druckverlustes in einer Rohrströmung sehr leicht eine Änderung der Dichte und der durchschnittlichen Blasengröße innerhalb verschiedener Bereiche der selben Strömung erzeugen kann. Dies kann nicht ignoriert werden.

2.1.2 Schaumstabilität von fließenden Schäumen

Schaum kann auf verschiedenen Wegen zerfallen. Einmal durch die Diffusion von Gas zwischen den einzelnen Schaumblasen und in die Umgebung, aber auch durch eine Entwässerung der Flüssigkeit aus den Membranen durch den Einfluss der Schwerkraft. Die Dauer dieser Vorgänge ist im Vergleich zu Schaumzerstörungsmechanismen durch Scherströmungen allerdings deutlich höher. Solange Scherbeanspruchungen die Schaumentstehung und Schaumzerstörung beeinflussen, kann fließender Schaum als dynamisch stabil bezeichnet werden.

2.1.3 Viskosität von Schaum

Fließender Schaum könnte als eine Strömung eines nicht-newtonischen Fluids bezeichnet werden. D.h. die Schubspannungen sind nicht direkt proportional zu den Geschwindigkeitsgradienten. Zusätzlich kann die Annahme von Homogenität in Wandnähe nicht angenommen werden. Es ist ein anormales Verhalten zu erwarten. Es wird im folgenden dargestellt, dass in Wandnähe offensichtlich ein Gleiten zwischen dem Schaum und der Wand entsteht.

2.1.4 Typisches Verhalten von Schaum

Ausnahmslos alle Messergebnisse zeigen eine Reduktion der Schein-Viskosität und eine Erhöhung der Scherspannungen (Pseudoplastisches Verhalten). Abbildung 3 zeigt beispielsweise den Druckverlust einer Rohrströmung für zwei verschiedenen Ausdehnungsraten E (Verhältnis Schaum zu enthaltener Flüssigkeit), (Rohrlänge 4 m, Durchmesser 6,35 mm).

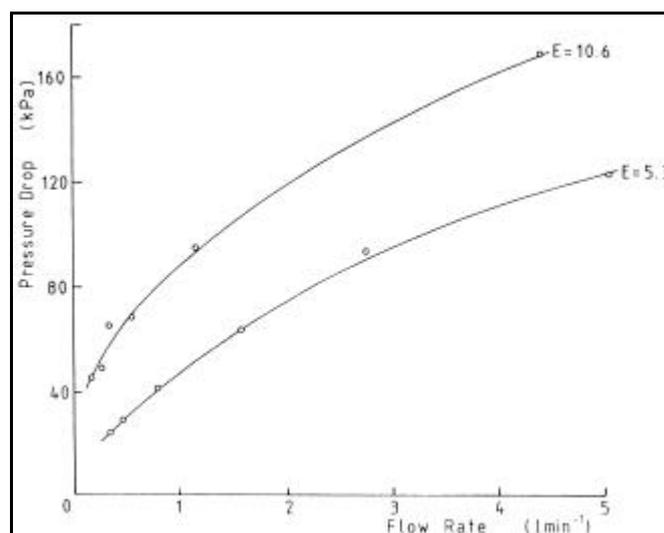


Abbildung 3: Typische Verhältnisse von Druckverlust zu Volumenstrom

Schaum verfügt über eine Fließgrenze unter der er sich nicht deformieren lässt. Oberhalb der Fließgrenze, zerfällt der Schaum in einer nichtlinearen Art und Weise. Diese Fließgrenze lässt sich in Form einer benötigten Energie, die zur Änderung der Geometrie der Membrankreuzungen von einem stabilen Zustand zu einem anderen, erklären.

Oberhalb der Fließgrenze sinkt die effektive Viskosität mit steigender Schubspannung. Die wahre Strömungskurve für den Schaum selbst ist in Abbildung 4 dargestellt.

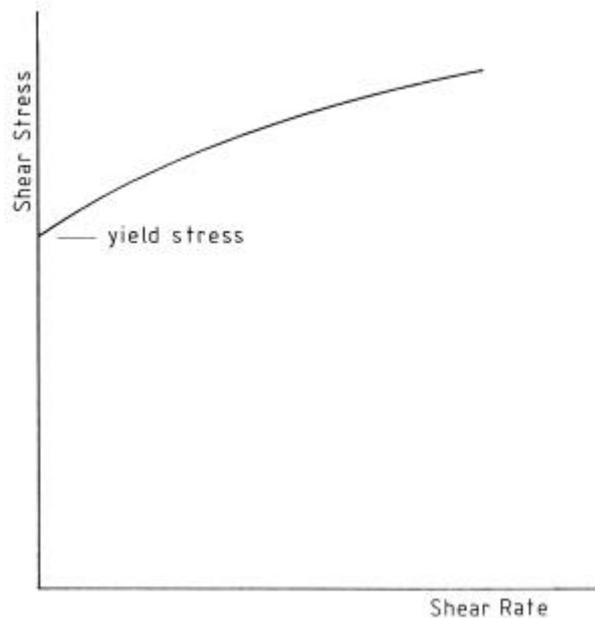


Abbildung 4: Verhältnis von Scherspannung zu Schergeschwindigkeit für Schaum

Die wichtigste Strömungscharakteristik ist das Gleiten, welches ein Strömen zulässt auch wenn die maximale Scherspannung unter der Fließgrenze liegt. Es gibt verschiedenen Möglichkeiten dieses Gleiten zu betrachten. Zum Beispiel als eine lokale und extreme Veränderung in der Viskosität, oder als eine wahre Diskontinuität in der Geschwindigkeit. Eine physikalische Erklärung ist die Betrachtung der Blasenverteilung an der Wand. Eine kugelförmige Blase kann nicht näher als ihr halber Durchmesser an der Wand sein. Daraus folgt eine geringes Vorhandensein von großen Blasen. Während einige kleinere Blasen Richtung Wand wandern können, wird der größte Verlust an größeren Blasen durch die Flüssigkeit erzeugt. Somit befindet sich in Wandnähe eine flüssigkeitsreiche, gleitende Grenzschicht, deren Viskosität niedriger als der übrige Schaum ist. Diese Schicht könnte somit als newton'sche Schicht mit den viskosen Eigenschaften der Basisflüssigkeit angesehen werden. Die Dicke dieser Grenzschicht steht mit der durchschnittlichen Blasengröße, welche in einer ersten Approximation als konstant zu sehen ist, in Relation.

2.1.5 Typische Werte

Die Fließgrenze von Schaum scheint über einen großen Bereich der Ausdehnungsraten bemerkenswert stabil zu sein und liegt bei 1 N/m^2 und 4 N/m^2 .

Die Dicke der Gleitschicht ist wahrscheinlich von der selben Größenordnung wie die Dicke der Membranen zwischen den Blasen. Damit hängt die Gleitschichtdicke neben der durchschnittlichen Blasengröße auch von der Ausdehnungsrate ab.

2.1.6 Beurteilung von Schaumuntersuchungen

Ein wesentliches Problem von Schaumuntersuchungen ist es, dass es keinen „Norm-Schaum“ gibt. Die Bestandteile des Schaums könnten sicherlich sehr einfach definiert werden, genauso wie ein Ausdehnungskoeffizient E (das Verhältnis von Schaum zu enthaltener Flüssigkeit) und ein Gasanteil. Es müsste allerdings auch eine Beschreibung der Schaumgeometrie, also durchschnittliche Blasengröße, Blasengrößenverteilung und räumliche Verteilung der Blasengrößen. Diese Eigenschaften sind allerdings nur sehr selten messbar.

Es ist sehr schwierig die Ergebnisse aus einer Geometrie auf eine andere zu übertragen. Die normalen Skalierungsgesetze (wie z.B. mit der Reynoldszahl) können nicht ohne die Definition eines Rheologie-Modells angewendet werden. Experimente sind daher sehr geometrieabhängig.

Aus diesen Gründen sind harte Fakten und genau untersuchte Modelle sehr schwierig aufzustellen. Sogar Fehler von 15% bei der Wiederherstellung von Ergebnissen können als Erfolg angesehen werden.

2.1.7 Schaumströmung in einem Rohr

Wenn die maximale Schubspannung in einer Rohrströmung die Fließgrenze des Schaums nicht übersteigt, wird eine Strömung nur aufgrund des Gleiten an der Wand erfolgen. Der Schaum fließt wie ein fester Propfen (s. Abbildung 5 a). Wird die Schubspannung erhöht, beginnt der Schaum sich in den Bereichen der maximalen Schubspannung, also an der Wand, zu verformen. Eine weitere Erhöhung der Schubspannung führt dazu, dass dieser Verformungsbereich sich nach innen vergrößert. Eine Propfenströmung im Zentrum der Strömung wird allerdings immer erhalten bleiben, solange die Schubspannungen an dieser Stelle gleich null sind (s. Abbildung 5 b).

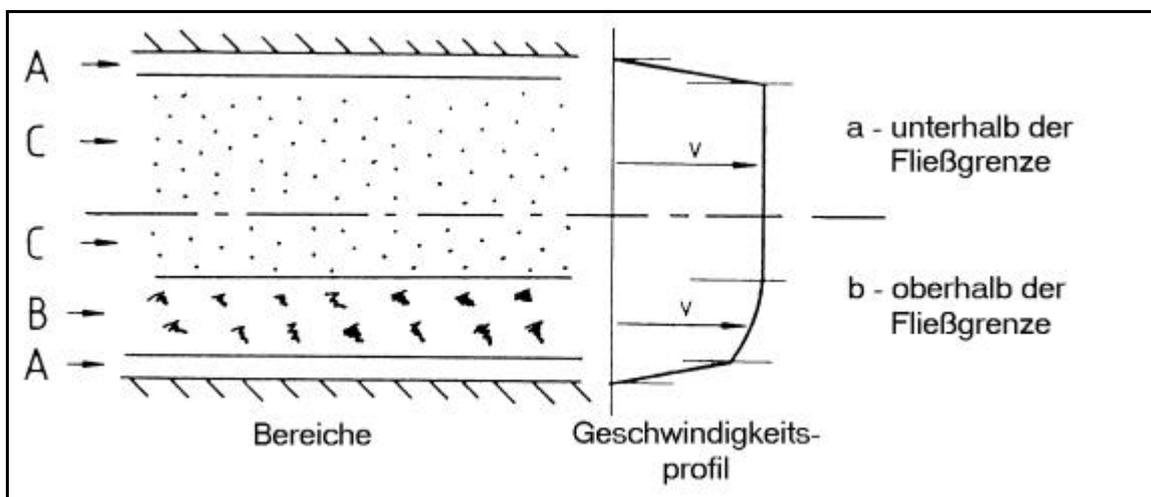


Abbildung 5: Rohrströmung.
 A - Gleitschicht, B - gescherter Schaum, C - zentrale Propfenströmung.
 a - Wand-Scherspannung unterhalb der Fließgrenze,
 b - Wand-Scherspannung oberhalb der Fließgrenze

2.1.8 Schaumströmung durch eine Einschnürung

Fließt ein newton'sches Fluid durch eine Einschnürung, wie z.B. bei einem nur teilweise geschlossenen Ventil (s. Abbildung 6), wird ein Druckverlust erzeugt. Dieser ist in etwa proportional zum Quadrat des Volumenstroms. Zum Teil ist innere Reibung und eine Ablösung der Strömung im expandierenden Teil die Ursache hierfür.

Bei Schäumen sieht es dagegen ganz anders aus. Der Druckverlust ist weniger vom Volumenstrom abhängig, es wurden sogar kleinere Druckverluste durch eine Erhöhung von Volumenströmen beobachtet. Auch wenn dieses Verhalten eher selten auftritt, ist es jedoch sehr deutlich, dass Schaum sich anders als ein newton'sches Fluid verhält.

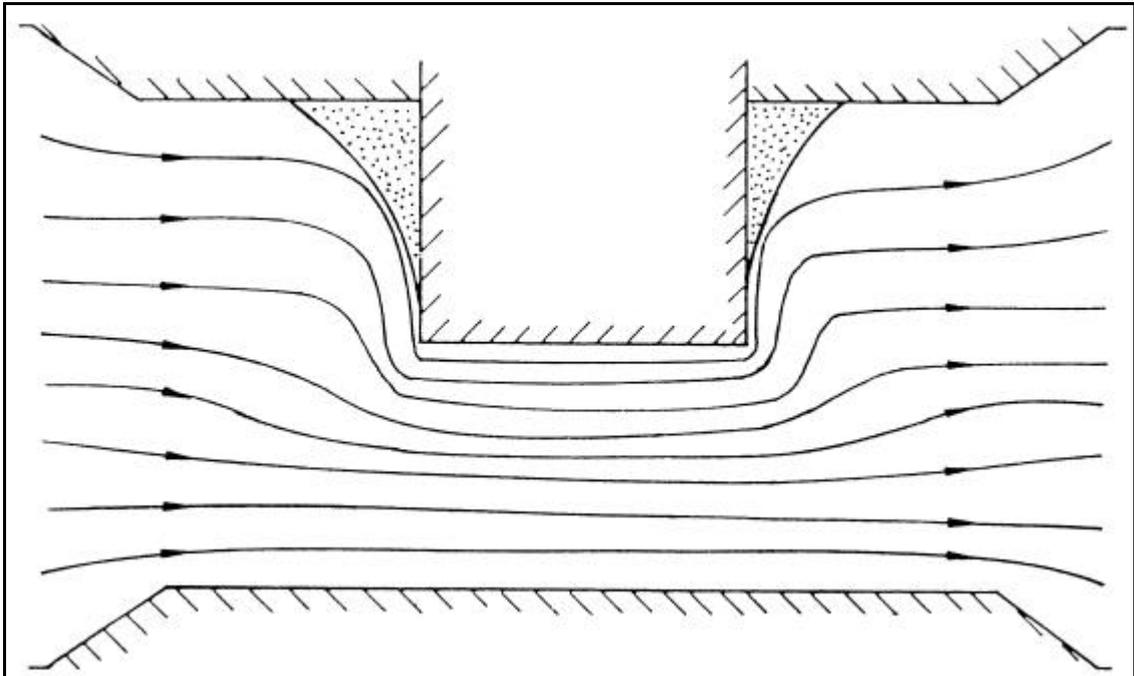


Abbildung 6: Schaumströmung durch ein Ventil (gate valve)

Die Art einer Einschnürungen beeinflusst die Schaumstruktur. Eine Strömung durch ein Kugelventil kann Schaum beinahe komplett zu einer Luft/Wasser-Strömung herabsetzen, während eine Strömung durch ein Membran-Ventil bei gleichem Druckverlust einen stabilen, homogenen Schaum erzeugen kann.

Dieses Verhalten scheint von folgenden Phänomenen abzuhängen: Schaum kann sehr weit ohne eine Aufspaltung expandiert werden, und hohe Spannungen können zu einer Vereinigung von Blasen führen, was den Schaum zerstört.

Abbildung 6 zeigt die aus experimentellen Daten ermittelten Stromlinien von Schaum durch ein Ventil (Gate Valve). Wie zu sehen ist, sind keine Anzeichen einer Ablösung an den scharfen Kanten zu erkennen, wie es bei einem newton'schen Fluid zu erwarten wäre. Stattdessen liegt die Strömung sehr eng an den Kanten der Umlenkung an. Die Erklärung hierfür liegt wahrscheinlich in den sehr dünnen Grenzschichten. Das „total momentum deficit“ in der Grenzschicht ist sehr klein, wodurch es in der Lage ist einen ungünstigen Druckgradienten zu durchdringen.

2.1.9 Zusammenfassung zur Rheologie von Schaum

Schaumströmungen unterscheiden sich sehr deutlich von newton'schen Fluiden oder „konventionellen“ Zweiphasenströmungen. Sie werden von der Gleitschicht dominiert, und jede Untersuchung ohne Berücksichtigung dieser Gleitschicht wird einen gewissen Fehler enthalten.

Es gibt nur sehr wenige Informationen über die Kompressibilität von Schaum und das Verhalten in Strömungen, die sich von geraden Rohrströmungen unterscheiden. Es verbleiben viele interessante und unerwartete Phänomene die noch zu untersuchen sind.

2.2 Einfluß von oberflächenaktiven Zusatzstoffen

Voraussetzung für das Schaumvermögen einer Flüssigkeit ist die Beschaffenheit des Oberflächenfilms, der die Gasblasen umgibt. Einzelne Inhaltsstoffe, insbesondere oberflächenaktive Substanzen, haben diesbezüglich großen Einfluß auf die Schaumeigenschaften.

Die oberflächenaktiven Substanzen bestehen aus hydrophilen und hydrophoben Zonen. Dabei sind die hydrophoben Zonen für die Oberflächenaktivität der Stoffe verantwortlich. Durch die geringe Anziehungskraft der hydrophoben Enden der Moleküle wird die Oberflächenspannung der Flüssigkeit herabgesetzt. Es ist nun weniger Energie für die Bildung neuer Oberflächen, d. h. für neuen Schaum, erforderlich. [8]

Grenzflächenaktive Substanzen reichern sich aufgrund ihres amphiphilen Charakters in der Oberfläche an. Die Änderung der Grenzflächenspannung σ mit der Raumphasenkonzentration c in Abhängigkeit von der Grenzflächenbelegung Γ lässt sich mit dem thermodynamischen begründeten Gibbs-Ansatz beschreiben:

$$\left(\frac{d\sigma}{R \cdot T \cdot d \ln c} \right)_T = -\Gamma$$

worin R die allgemeine Gaskonstante und
 T die Absoluttemperatur

bezeichnen. [3]

Da die Tensid-Gesamtmenge je Lamellenabschnitt auch bei vergrößerter Oberfläche konstant bleibt, ist die Spannung auch nach der Einstellung des stofflichen Gleichgewichtes höher als im ungedehnten Zustand. Dieser Tatbestand wird als Gibbs-Effekt bezeichnet. Die Zunahme der Spannung bei einer Dehnung beschreibt eine Elastizität. Die Lamelle hat somit durch die Anwesenheit der Tenside elastische Eigenschaften erhalten. Die zeitliche Spannungserhöhung über dem Gibbs-Wert, bei Dehnung mit nicht erfolgtem Diffusionsausgleich zwischen Raumphase und der Grenzfläche bezeichnet man als Marangoni-Effekt erster Art.

Findet punktuell eine Störung der Lamelle statt, so führt die lokale Spannungserhöhung dazu, dass die umliegenden Grenzflächen zur geschwächten Stelle gezogen werden. Hierbei wird die Flüssigkeit der benachbarten Lamellenbereiche zur geschwächten Stelle mitgerissen, so dass deren Dicke wieder zunimmt. Diesen Effekt nennt man Marangoni-Effekt zweiter Art. [3]

3 Kennzeichnende Größen

3.1 Gasanteil

Als eine kennzeichnende Größe von Gas/Flüssigkeits-Systemen dient der Gasanteil

$$\varphi = \frac{V_g}{(V_g + V_l)}$$

mit V_g = Gasvolumen

V_l = Flüssigkeitsvolumen

Je nach Gasanteil unterscheidet man zwischen

Gasdispersion ($\varphi = 0,52$),

Kugelschaum ($0,52 \leq \varphi \leq 0,74$) und

Polyederschaum ($\varphi > 0,74$).

In Gasdispersionen überwiegt in der Regel der Flüssigkeitsanteil $\varepsilon = (1 - \varphi)$.

In Kugelschäumen liegt die Flüssigkeit nur noch als Zwickelvolumen vor, deshalb gilt für die lockerste Kugelpackung mit gleich großen Blasendurchmessern $\varphi = 0,52$ und für die dichteste $\varphi = 0,74$. Bei Gasanteilen $\varphi > 0,74$ benötigen die Blasen mehr Platz als für die dichteste Kugelpackung möglich ist. Sie flachen an den Berührungsstellen ab und bilden Lamellen. Die Lamellen bestehen aus Doppelfilmen mit angereicherten grenzflächenaktiven Stoffen und dazwischenliegender zunächst frei beweglicher Flüssigkeit. [2]

3.2 Zumischung

Ist der %-Volumenanteil von Schaummittel der dem Wasser beigemischt wird. Bei Schwertschaum 3-5%. Bei Mittel- und Leichtschaum 2-3%, bei Spezialschaummitteln kann die Zumischung bis zu 10% betragen. [9]

3.3 Wasserhalbzeit

Als Wasserhalbzeit bezeichnet man die Zeit in der die Hälfte der im Schaum enthaltenen Flüssigkeitsmenge (WSG) ausgeschieden ist. WHZ= 10 min. bedeutet, daß von einer Masse eines Schaums z.B. 6 kg, die Hälfte des WSG (im Beispiel 3 kg) nach 10 min. als Flüssigkeit ausgeschieden ist. [9]

3.4 Grenzfläche

Die Berührungsfläche zwischen zwei unterschiedlichen Aggregatzuständen, z.B. zwischen einer Flüssigkeit und einem Gas, wird als Grenzfläche bezeichnet. Der Flüssigkeitsspiegel der Versuchsflüssigkeit stellt eine Grenzfläche dar. Aber auch an allen anderen Stellen, an

denen eine Flüssigkeit mit einem Gas in Berührung kommt, wie z.B. bei Luft-, Gas- oder Mikrobblasen, entsteht eine Grenzfläche. [8]

3.5 Mittleres Schaumvolumen V_s

Das mittlere Schaumvolumen ist das Volumen an Schaum, welches mittels Versuchsanlage in einer festgelegten Zeit entstanden ist. Das mittlere Schaumvolumen ist der Mittelwert aus drei Vergleichsmessungen unter gleichen Versuchsbedingungen, es wird in ml gemessen. [8]

3.6 Oberflächenviskosität

Die Oberflächenviskosität ist die Viskosität der Flüssigkeit auf der Oberfläche einer Lamelle. Sie beschreibt die Stärke der Kohäsion zwischen den absorbierten Molekülen auf dem Oberflächenfilm. [8]

Die Viskosität einer Flüssigkeit an einer Oberfläche ist im Grunde der Oberflächenspannung gleichzusetzen.

3.7 Oberflächenelastizität

Die Oberflächenelastizität beschreibt die Fähigkeit einer Schaumlamelle, der örtlichen Kraftwirkung standzuhalten. Bei der Dehnung der Lamelle steigt die Oberflächenviskosität durch die Verminderung der Konzentration der lokalen oberflächenaktiven Stoffe. [8]

4 Entstehung von Schaum

Für das Entstehen von Schaum kann eine Gleichung für die kritische Gasgeschwindigkeit in der Flüssigkeit angegeben werden. Sie lautet:

$$U_{G,krit.} = a + bU_L,$$

wobei U_G und U_L Gas- bzw. Flüssigkeitgeschwindigkeiten und a und b unabhängige, empirische Konstanten sind. Liegt die Gasgeschwindigkeit unter der kritischen Gasgeschwindigkeit entsteht kein Schaum, liegt sie darüber entsteht welcher. [5]

Experimente zeigen, dass die Art der Schaumerzeugung und die Geometrie des Meßgeräters einen erheblichen Einfluß auf Schaumbildung und Stabilität besitzen. Folglich muss eine Charakterisierung stets prozessnah erfolgen. [3]

Schäume können durch chemische Reaktionen, durch das Einleiten eines Gases in eine Flüssigkeit oder durch heftige Bewegungen an der Flüssigkeitsoberfläche erzeugt werden. Durch ausreichend hohe Scher- oder Zugkräfte wird die kontinuierliche Phase aufgerissen und das Gas kann eindringen.

Eine hohe Oberflächenturbulenz beim Begasen oder bei Befüll- bzw. Rührvorgängen führt zu einem Einschluß von Luft in die Suspension und unter Umständen zum Entstehen von Schaumblasen.

Schäume finden auch in der Lebensmittelherstellung Verwendung. In Abhängigkeit von der Konsistenz der viskosen oder viskoplastischen flüssigen Phase wird das zu dispergierende Gas durch Injektion, Einschlagen, Rühren, Kneten oder Ziehen eingebracht. Die Schaumstruktur entsteht durch die feine Verteilung eines Gases in einem Lebensmittel oder in einem Halbfabrikat.

Die Schaumhaltbarkeit wird von vielen unterschiedlichen Faktoren beeinflusst. Bestimmte Zusätze, aber auch technologische Faktoren, vermögen die Schaumhaltbarkeit erheblich zu verlängern. Die Oberflächenelastizität ist das wichtigste Merkmal der Schaumhaltbarkeit. Die Oberflächenelastizität beschreibt die Fähigkeit einer Schaumlamelle, der örtlichen Kraftwirkung standzuhalten. Bei der Dehnung der Lamelle steigt die Oberflächenviskosität durch die Verminderung der Konzentration der lokalen oberflächenaktiven Stoffe. Dieser Konzentrationsunterschied bewirkt, daß oberflächenaktive Substanzen aus der Flüssigkeit in den Film gelangen und ein Reißen der Filmschicht verhindern.

Die Schaumstabilität ist abhängig von der Geschwindigkeit, mit der die oberflächenaktiven Substanzen in den Film eindringen bzw. ihn wieder verlassen. Je schneller sie in den Film eintreten, desto besser kann Schaum entstehen. Die Lebensdauer des Schaums wird um so länger, je langsamer die oberflächenaktiven Substanzen die Filmschicht verlassen.

Die Oberflächenviskosität ist eine andere wichtige Größe, die Einfluß auf die Schaumhaltbarkeit besitzt. Sie beschreibt die Stärke der Kohäsion zwischen den absorbierten Molekülen auf dem Oberflächenfilm. Hochmolekulare Substanzen erhöhen z.B. die Viskosität der Flüssigkeit und verzögern den Rückfluß derselben aus den Blasenzwischenräumen. In nichtstabilisierten, niederviskosen Flüssigkeiten, wie z. B. Selterswasser, nähern sich die aufgestiegenen Gasblasen an und fließen durch zwischenpartikuläre Wechselwirkungen schnell zusammen. Ein dauerhafter Schaum kann nicht entstehen. Je größer die Viskosität ist, desto weniger Moleküle können aus dem Oberflächenfilm ausbrechen. Es werden drei verschiedenen Gründe für diese Erklärung angegeben:

- a) Der geringe Diffusionskoeffizient größerer Moleküle unterstützt die Bildung eines stabilen Schaumes.
- b) Die Wechselbeziehung der Moleküle untereinander.
- c) Die Struktur des Films wird durch eine zweite Substanz, die in den Film eintritt und in einer Wechselbeziehung zu den Häutchenbildnern steht, verändert. Metallionen oder -Säuren können mit Proteinen Verbindungen eingehen und die Struktur des Oberflächenfilms so verändern, daß die Schaumhaltbarkeit verlängert wird. [8]

4.1 Schaumbildung in Blasensäulen

Bei einer Blasensäule wird Gas von unten in eine Flüssigkeit eingeleitet. Die Entstehung von Schaum erfolgt dabei erst bei der Überschreitung einer bestimmten kritischen Gasgeschwindigkeit. Eine generelle Abschätzung, wann es zur Schaumbildung kommt, kann nicht gegeben werden.

An der Phasengrenzfläche zwischen Schaum oben und sprudelnder Schicht unten sind die Topologie (räumliche Struktur), der Gasanteil und Geschwindigkeiten sehr stark diskontinuierlich. [4]

5 Schaumvermeidung

Die Bildung von Schäumen läßt sich in vielen Fällen einschränken. Möglichkeiten ergeben sich hierbei z.B. durch die Strömungsführung. Eine häufig zu beobachtende Ursache der Schaumbildung ist der Flüssigkeitszulauf. Eine massive Flüssigkeitsstrahl-Zuführung oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche führt zum Einschlagen von Luft in das Reaktormedium und somit zur Schaumbildung. Weitere Schaumbildung tritt an scharfen Strömungsumlenkungen, in offenen Gerinnen oder durch ein- bzw. auftauchende Bauelemente auf. Eine mögliche Schaumvermeidung ist die Zufuhr von Frischwasser etc. im Bereich der hohen Schaumbildungszonen, so daß sich hier lokal die Tensidkonzentration reduziert.

Verunreinigungen durch Feststoffe können die Schaumstabilität erheblich erhöhen, da sich die Drainage der Flüssigkeit verlangsamt. Die Verminderung der Verschmutzung oder veränderte Partikelgrößen können sich hier positiv auswirken.

Erheblichen Einfluß auf die Schaumstabilität besitzen der pH-Wert und die Elektrolytkonzentration. Je nach eingesetztem Tensid beeinflussen diese Werte die Schaumstabilität positiv oder negativ. So können Salze die elektrischen Doppelschichten reduzieren, was zu einer verminderten Abstoßung der Lamellenoberflächen führt. Gleichzeitig vermindern sie jedoch die Abstoßung der einzelnen Tenside in der Grenzfläche, wodurch höhere Belegungen in der Oberfläche bei gleichbleibender Raumphasenkonzentration eine erhöhte Schaumstabilität verursachen.

Letztlich ist die Auswahl der eingesetzten oder auftretenden Tenside entscheidend für die Schaumstabilität. Die Zugabe weiterer schaumarmer Tenside, die zu Verdrängungseffekten in der Grenzfläche führen, kann die Schaumbildung deutlich vermindern. [3]

6 Grundlagen und Methoden der mechanischen Schaumzerstörung

Mechanische Verfahren der Schaumzerstörung vermeiden Kontaminationen und Produkt-erwärmung. Im wesentlichen basiert sie auf der Scherbeanspruchung von Schaumlamellen.

Als Grundprinzipien der mechanischen Schaumzerstörung sind zu nennen:

- Beschleunigung der Drainage,
- Lokale Minimierung der Lamellendicke,
- Lokale Minimierung der Grenzflächenbelegung,
- Reduktion der gesamten Tensidmenge im Schaum.

Eine Beschleunigung der Drainage lässt sich durch die Ausnutzung von Fliegkräften erreichen. Dieser Dehnvorgang ist ein wesentlicher Vorgang mechanischer Schaumzerstörer, der besonders bei rotierenden Einbauten und Beregnungen zu nennen ist. Infolge der Dehnung verringern sich aufgrund der begrenzten Tensidmenge die viskoelastischen Eigenschaften. Lokal werden angenähert die Bedingungen eines reinen Flüssigkeitsfilmes geschaffen. Er zerfällt, da die stabilisierenden Effekte der tensidbeladenen Grenzfläche fehlen.

Betrachtet man einen Lamelle, die einer sehr langsamen Dehnung unterliegt, so wird sie sich gleichmäßig dehnen. Zusätzlich gelangt Flüssigkeit aus den Plateaubereichen in den Film. Aufgrund der Spannungserhöhung treten Umlagerungsvorgänge im Schaum auf, die Zerstörungswirkung ist gering. Führt man jedoch eine schnelle Bewegung aus, so ist die Tragheit der Lamelle zu berücksichtigen. [3]

Mechanische Schaumzerstörer erfordern in der Regel aufwendige Apparaturen mit Regeleinrichtungen. Bei stabilen Schäumen kann es infolge der mechanischen Beanspruchung zur Sekundärschaumbildung kommen. Die dabei entstehenden Kleinblasen stabilisieren das Primärblasensystem, indem sie die Drainage im Schaumsystem behindern. Angewendet werden rotierende Apparate, akustische Methoden, Systeme mit schnellen Druckwechsellvorgängen, dispergierte arteigene Flüssigkeit, Zyklone und poröse System. [2]

Einen Überblick über die verbreitetsten Schaumzerstörungsverfahren (inklusive thermischer und chemischer Verfahren) gibt Tabelle 1.

	Verfahren	Wirkprinzip	Anwendungsgebiet	Vorteile/Nachteile
chemische Schaumzerstörung	Zugabe der Chemikalien zum Reaktormedium Aufsprühen der Chemikalien nach Bedarf	Lokale Verminderung der Grenzflächenspannung Beschleunigtes Ausdünnen der Lamellen durch Spreitung der Schaumbrecher auf der Lamellengrenzfläche und Mitreißen grenzflächennaher Flüssigkeit. Verdrängen schaumstabilisierender Substanzen aus der Grenzfläche Beschleunigung der Drainage Verminderung der Grenzflächenelastizität Ausbildung von starren Mischfilmen Herabsetzen elektrostatischer Abstoßung	Problemschäume d.h. hohe Gasdurchsätze, geringe Blasengrößen, hohe Tensidkonzentration	+ sehr wirkungsvoll + geringer apparativer Aufwand + Verhinderung der Schaumbildung - Rückgang des Stoffübergangs um bis zu 50% - Kontamination des Produktes, aufwendige Reinigung - Umweltprobleme bei der Entsorgung - teuer
thermische Schaumzerstörung	Gefrieren	Abkühlen der Schäumerlösung unter die Schmelztemperatur		- hoher Energiebedarf
	Erwärmen durch Kontakt mit Heizflächen oder Dampf Mikrowellen Infrarotstrahlung Warmluftapplikationen	Verdampfen von Lamellenflüssigkeit Beschleunigte Drainage durch Viskositätserniedrigung Direkter Bruch von Schaumlamellen Mikrowellen erhitzen den ganzen Schaum auf einmal, vor allem die Plateauränder	Schaumfraktionierung, Destillation, thermisch stabile Medien	+ universell - Verkrustungen an den Wärmetauschern - Verunreinigung des Mediums durch Zersetzungsprodukte - hoher Energiebedarf
mechanische Schaumzerstörung	rotierende Einbauten	Aufbringen von Scherkräften, Beschleunigungskräften, Zentrifugalkräften, Corioliskräften Schaumverdichtung durch Trennung in Gasphase und Sekundärschaum Abgeschleuderte Flüssigkeit zerstört Lamellen	Schäume niedriger Viskosität	+ universell + erzeugt häufig fließfähigen Sekundärschaum - hohe Investitionskosten - schnell bewegte Teile - Erzeugung von Sekundärschaum kann zum Fluten führen
	Zyklone	Beschleunigung der Drainage in den Lamellen durch Zentrifugalkräfte, Scherbeanspruchung Beschleunigung der Lamellenaustrocknung Stoßvorgänge	Flotationschäume	hoher Mengendurchsatz - hoher Energieverbrauch zur Vakuumherzeugung - schwierige Reinigung - hohe Investitionskosten
	Zentrifugen, Vakuumzentrifugen mit Zwangsführung		hochviskose, feinblasige Schäume; Lebensmitteltechnik	
	Ultraschall	starke Druckwechsel, Kavitation	höherviskose Schäume, Filmemulsionen, flüssigkeitsreiche Kugelschäume	- geringe Wirksamkeit
	Schaumsirenen, Pfeifen, Hörner	'periodische Zerstörungskräfte' induzierte Resonanzschwingungen Rayleighscher Strahlungsdruck Schallwind erzeugt Turbulenzen Oberflächenwellen		- hohe Lärmbelastung - hoher Energieverbrauch
	Ejektor mit Prallplatte Düsen oder Membranen	Beschleunigungskräfte Druckwechsel im Schaum beim Pressen durch die Düse oder Membrane		
	Flüssigkeitssprays Dispergieren mit rotierender Scheibe Tropfenberegnung mit Brausen	Zerschlagen von Lamellen Störung von Adsorptionsschichten durch schnell aufgesogene Flüssigkeit		+ geringe Investitionskosten + wenig bewegte Teile - Flüssigkeitsanteil im Schaum wird erhöht - für grobblasige Schäume
	poröse Materialien	Koaleszenzförderung durch ruhende Einbauten mechanische Energie wird durch Druckverlust erbracht	niedrigviskose Schäume	+ geringe Investitionskosten + auch für kleinblasige Schäume + keine beweglichen Teile + weitgehend wartungsfrei - für geringen Schaumanfall

Tabelle 1: Schaumzerstörungsmethoden [3]

Bei sehr stabilen Schaumsystemen versagen jedoch die meisten mechanischen Schaumzerstörungsverfahren. Am häufigsten werden schnell rotierende Apparate eingesetzt, da sie weitgehend unabhängig von den Betriebsgrößen des Verfahrensprozesses arbeiten. Abbildung 7 zeigt Darstellungen verschiedener Schaumzerstörer.

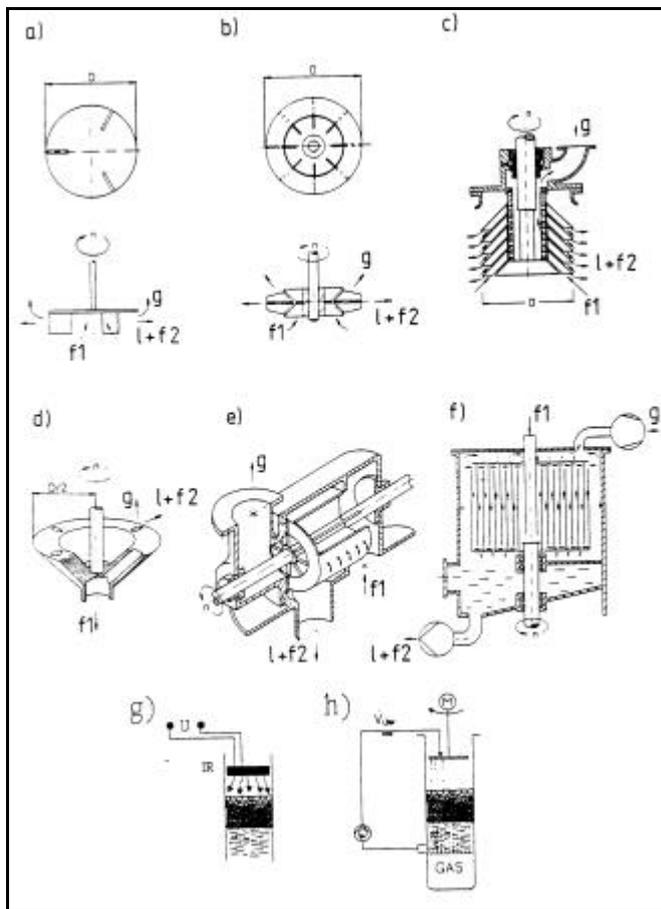


Abbildung 7: Schaumzerstörer [3]

a rotierende Scheibe mit Leitblechen, **b** Schaumturbine, **c** konische Teller (Fundafom), **d** rotierender Kegel, **e** rotierender Zylinder, **f** koaxiale Zylinder, **g** thermische Zerstörung mittels IR-Strahlung, **h** Beregnen. Es bedeuten **g** Gas, **l** Flüssigkeit, **f1** Primärschaum und **f2** Sekundärschaum.

Bei der rotierenden Scheibe ist die schaumzerstörende Wirkung zunächst durch Scher- und Beschleunigungskräfte gegeben. Sie läßt sich durch ein schlecht benetzbares Material, z.B. PTFE, verbessern.

In rotierenden Zylindersystemen oder konischen Lamellenpaketen wirken neben den Scher- und Beschleunigungskräften am Eintritt noch Zentrifugalkräfte entlang des zylindrischen Mantels. Durch Scher- und Beschleunigungskräfte kommt es zur Zerteilung der Schaumblasen, wobei ein großer Teil des eingeschlossenen Gases abgegeben wird. Liegen sehr schaumfähige Lösungen vor, so werden Kleinblasen erzeugt, die den sogenannten Sekundärschaum bilden. Die Blasengröße des Sekundärschaums ist abhängig von der Rotorumfangsgeschwindigkeit.

Zur Schaumzerstörung in Zyklo- nen benötigt man in der Regel einen zusätzlichen Gasstrom, um die notwendige Drallströmung zu erhalten.

Ejektoren ergeben eine Zerstörung des Schaumes durch Beschleunigung der Schaumblasen und Aufschlagen der Blasen auf eine Prallplatte. Für dieses in Laborapparaten eingesetzte Verfahren zur Schaumzerstörung erfolgt der Transport des Schaumes in den Ejektor durch ein von außen angelegtes Vakuum.

Poröse Systeme zeigen eine gute schaumzerstörende Wirkung, solange das Porensystem noch nicht benetzt ist.

Die Schaumzerstörung durch Beregnen mit arteigener Flüssigkeit hängt ab von der Auftreffgeschwindigkeit der Tropfen auf das Schaumsystem, der Tropfenfrequenz, dem Tropfen- und Blasendurchmesser sowie der Schaumfähigkeit des Systems. Bei zu niedriger Eintrittsgeschwindigkeit dringt der Tropfen nicht tief genug in den Schaum ein, bewässert ihn und erhöht dadurch seine Lebensdauer. Schlägt der Tropfen in die tensidbeladene Flüssigkeit, dann wird Sekundärschaum erzeugt. Für die optimale Prozeßführung muß der Tropfen vor dem Eindringen in die Lösung zur Ruhe kommen (s. Abbildung 8). [2]

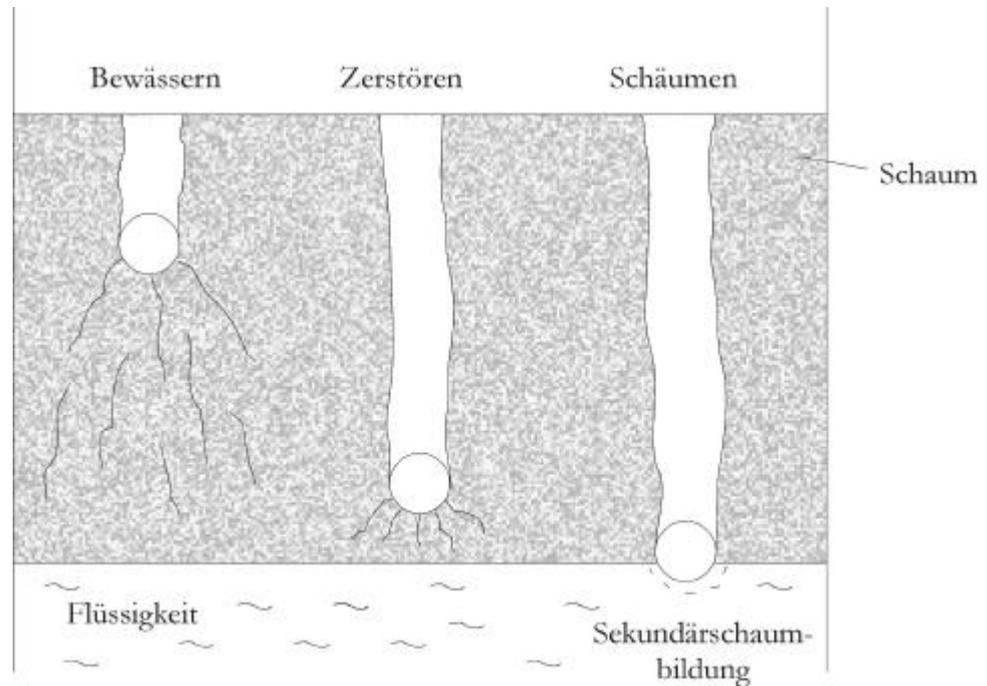


Abbildung 8: Schaumzerstörungsmechanismus beim Beregnen mit arteigener Flüssigkeit

Entsteht bei der Schaumzerstörung Sekundärschaum, dann ist bei der Rückführung von diesem verdichteten Schaums darauf zu achten, daß dabei kein neuer Schaum entsteht. Der verdichtete Schaum sollte nach dem Schaumzerstörer so sanft umgelenkt werden, daß es nicht zu einer Neubildung von Schaum kommt. [1]

7 Schaumbildung beim Befüllen von Flaschen

Im industriellen Herstellungsprozeß sind Schäume häufig nicht erwünscht, da sie diesen Prozeß oft stören und die Nennleistung der Abfüllmaschinen herabsetzen. Bei der Verarbeitung von schäumenden Flüssigkeiten kommt es in der Industrie durch die Schaumentstehung zu erheblichen wirtschaftlichen Verlusten. Daher ist man in der Getränkeindustrie bemüht, eine Schaumbildung bei der Herstellung zu verhindern bzw. die Zerfallsgeschwindigkeit zu erhöhen. Vor allem in der alkoholfreien Getränkeherstellung gibt es diesbezüglich bisher nur unzureichende Forschungsergebnisse. Eine mechanische Schaumzerstörung gelingt durch Schaumzentrifugen, Schaumzerstörer oder Schaumabsauger. Der Schaum wird nach dem Zentrifugalprinzip zwischen stehenden und rotierenden Streckmetalleinbauten zerrieben. Diese rotierenden Sonderkonstruktionen trennen die relativ stabilen Schäume in ihre beiden Komponenten Flüssigkeit und Gas. Das Ziel der Lebensmittel- und Getränkeindustrie ist es, den Behälterraum ohne störende Schaumentstehung maximal nutzen zu können.

Für den Abfüllprozeß sollten möglichst kurze Wege gewählt werden, um die Fließgeschwindigkeit gering zu halten. Das Gefälle beträgt in dieser Phase des Herstellungsprozesses 1 bis 1,5 %. Das verwendete Rohrmaterial hat eine glatte Innenfläche. So kann nicht nur den hygienischen Bestimmungen entsprochen, sondern auch die Entstehung bzw. Ansammlung von Gasblasen vermieden werden, die im Füller zu Komplikationen führen können. Für das Einfüllen des Erzeugnisses in die Flasche verwendet man möglichst ein langes Füllrohr, welches den Flüssigkeitsstrom an der Flascheninnenseite blasen- und wirbelfrei nach unten lenkt. Eine Flüssigkeit fließt um so ruhiger, je größer der Querschnitt und je geringer die Fließgeschwindigkeit ist. Die Fließgeschwindigkeit schwankt bei der Sektherstellung zwischen 0,5 m/s und 0,8 m/s. Unter diesen Voraussetzungen werden möglichst wenig Gasteilchen von der Glaswand der Flasche mitgerissen. Unter günstigen Voraussetzungen werden die Gase an der Flaschenoberfläche durch den einfließenden Schaumwein restlos verdrängt. Treten jedoch Verunreinigungen an der Glaswand auf, kann der Wein das Glas nicht vollständig benetzen. Unter den Verunreinigungen bzw. in feinen Rissen der Glaswand verbleiben Luftreste. Aus diesen Mikroblasen entsteht während der Entlastungsphase im Füller unerwünschter Schaum, so daß die Flasche nur teilweise gefüllt werden kann. Die im Herstellungsprozeß von Schaumweinen verwendeten Membran-Kerzen-Filter vor dem Füller halten vermutlich die Mikroblasen zurück und verhindern ein späteres Auftreten des Gushings¹. [8]

¹ "Gushing" bezeichnet das plötzliche Entweichen der Kohlensäure beim Öffnen einer Flasche Bier, das von so starker Schaumbildung begleitet ist, daß es zu einer mehr oder weniger starken Entleerung der Flasche kommt.

8 Methoden des Schaumtestens

Herkömmliche Methoden des Schaumerzeugens beruhen auf mechanischen Prinzipien, wie z.B. Schütteln (ASTM D3601-88 (Reapproved 1997)), Schlagen (DIN 53902-1), Ross-Miles-Verfahren (DIN 53902-2), Duschen (DIN 51395-1) oder Lufteintrag.

Zur Schaumhöhenmessung werden folgende Verfahren verwendet:

Visuell

Über eine am Messgefäß befindliche Skale wird vom Anwender in bestimmten Intervallen die Schaumhöhe visuell ermittelt, was große Sorgfalt erfordert, da die Schaumoberfläche nicht eben ist und somit subjektive Fehler nicht auszuschließen sind.

Durchlicht

Mit Hilfe von Lichtschranken wird die Schaumhöhe gemessen, da der Schaum das ausgesandte Licht bricht und somit den Lichtempfänger abdunkelt. Das Messergebnis kann durch Verschmutzungen des Gefäßes verfälscht werden. Unebenheiten der Schaumoberflächen werden nicht erfaßt.

Bei diesen Methoden des Schaumtestens gibt es die Nachteile, dass entweder die Messergebnisse nicht reproduzierbar waren oder subjektive Einflüsse die Ergebnisse beeinflussen.

Das neue SITA-Schaumtestsystem liefert über das patentierte Rotor-Verfahren, bei dem eine definierte Schaumerzeugung erfolgt, und über einen speziellen Sensor, der das Oberflächenprofil des Schaums erfaßt, reproduzierbare Messergebnisse ohne subjektive Einflüsse. [7]



9 Vergleichsmöglichkeiten mit der Literatur

Diagramme aus [5]:

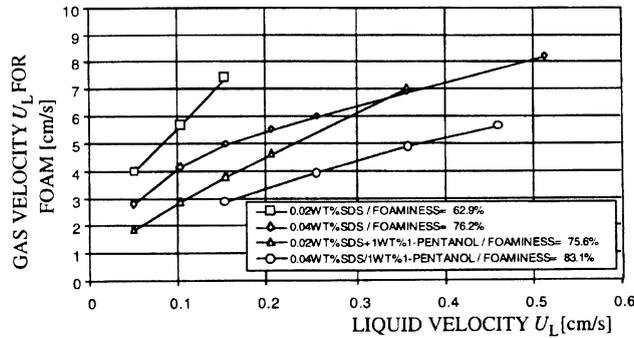


Figure 2. Plots of [2] giving U_G and U_L for the inception of foaming. The constants a and b in [2] depend on the properties of the surfactant solution.

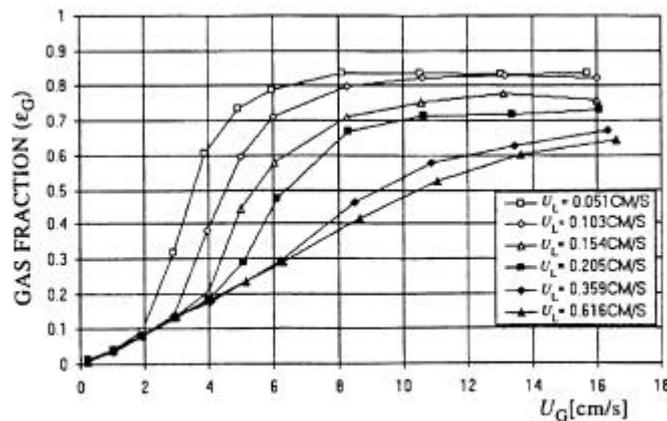


Figure 4. Gas fraction as a function of gas velocity: water/0.02 wt% SDS/1 wt% 1-pentanol.

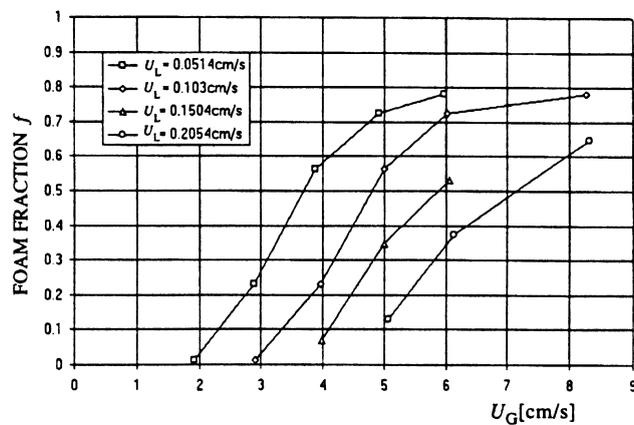


Figure 5. Foam fraction f as a function of gas velocity: water/0.02 wt% SDS/1 wt% 1-pentanol.

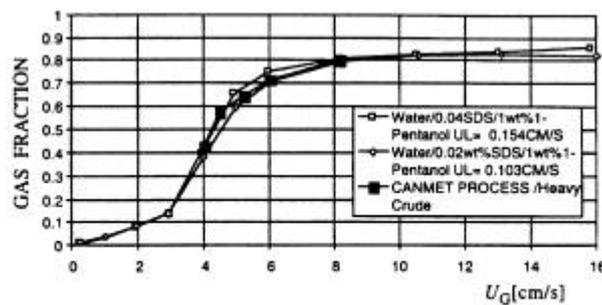


Figure 6. Comparison between gas fraction in CANMET process and cold model experimental results (figure 1) using water/SDS/1-pentanol systems. The CANMET hydrocracking reactor is 2 m in diameter with a capacity of 800 ton/day and operates at a temperature greater than 400°C.

Table 1. Bubble size and constant a from [16]

System	Gas velocity (cm/s)	Liquid velocity (cm/s)	Average foam bubble diameter (cm)	Average α from [16] (cm/s)
Water/0.05 wt% SDS	4.9	0.05	0.2	9×10^{-4}
	8.1	0.05	0.3	
	6.0	0.1	0.3	
	8.2	0.1	0.3	
	10.5	0.1	0.4	
Water/0.05 wt% SDS/ 1 wt% 1-C5	4.9	0.154	0.2	20×10^{-4}
	6.0	0.154	0.2	
	8.2	0.154	0.3	

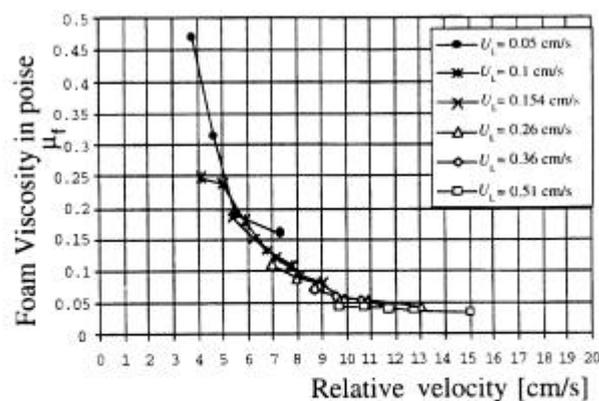


Figure 7. Foam viscosity as determined by [21]. The derivation of this equation shows that in principle the foam viscosity depends on flow variables $v_G - v_L$ and U_L , but this figure shows that μ_f can be well approximated by a function of the slip velocity alone; regression of the data gives $\mu_f = 8.0(v_G - v_L)^{-2.151}$ with a regression coefficient $R^2 = 0.9893$.

Literatur:

- [1] **Zlokarnik, Marko:** Auslegung und Dimensionierung eines mechanischen Schaumzerstörers. Chem.-Ing.-Tech. 56 (1984) Nr. 11, S. 839-844
- [2] **Pahl, M.H.; Meinecke, H.:** Schaumzerstörung mit arteigener Flüssigkeit. Dechema-Monographien Band 114 – VCH Verlagsgesellschaft 1989
- [3] **Pahl, M.H.; Franke, D.:** Schaum und Schaumzerstörung – ein Überblick. Chem.-Ing.-Tech. 67 (1995) Nr. 3, S. 300-312
- [4] **D.D. Joseph:** Questions in Fluid Mechanics: Understanding Foams and Foaming. Journal of Fluids Engineering, September 1997, Vol. 119/S. 497-498
- [5] **Guitian, J. and D. Joseph:** How Bubbly Mixtures Foam and Foam Control Using a Fluidized Bed. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 24 ,(1998), S. 1-16.
- [6] **Calvert, J.R.:** Foam in Motion. Aus Wilson, A.J.: Foams: Physics, Chemistry and Structure. Springer-Verlag Berlin, 1989
- [7] <http://www.sita-messtechnik.de/schaum/>
- [8] <http://www.hausarbeiten.de/rd/archiv/ernaerungswiss/ernaerungswiss-o-schaum.shtml>
- [9] <http://people.freenet.de/ffniederwalluf/schaum.htm>
- [10] <http://www.iwf.de/iwfger/alldaten/b1951.html>

Weitere Literatur zum Thema Schaum

- ◆ Joseph, D.D., "Questions in Fluid Mechanics: Understanding Foams and Foaming." Technical Forum. Journal of Fluids Engineering, 119, 497-498 (1997).
- ◆ Mata, C. and D. Joseph: Foam Control Using a Fluidized Bed of Hydrophobic Particles. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 25 (1999), S. 63-85
- ◆ Furchner, B.; Mersmann, A.: Mechanische Schaumzerstörung. Chem.-Ing.-Tech. 58 (1986) Nr. 4, S. 332-333
- ◆ Lohmann, Th.; Pahl, M.H.: Mechanische Schaumzerstörung feststoffhaltiger Schäume. Chem.-Ing.-Tech. 65 (1993) Nr. 11, S. 1362-1365
- ◆ Wilson, A.J.: Foams: Physics, Chemistry and Structure. Springer Verlag London, 1989
- ◆ Institut für den Wissenschaftlichen Film
Schaumentstehung und Schaumzerstörung - Beregnung mit arteigener Flüssigkeit
 Creation and Destruction of Foam - Spraying with Liquids of the Same Type
Pahl, Manfred (Paderborn); Meinecke, Heinrich (Münster)
 Flüssige Schäume spielen in zahlreichen verfahrenstechnischen Abläufen eine Rolle; zu ihrer Beherrschung sind Kenntnisse über Aufbau, Bildung und Unterdrückung von Schäumen erforderlich. Grundlegende Eigenschaften dieser dispersen Systeme aus Gasen und Flüssigkeitslamellen werden experimentell an Modellsystemen aus Einzelblasen und im Trick erläutert. Die Mechanismen der Schaumzerstörung durch Beregnung mit arteigener Flüssigkeit werden in starker Zeitdehnung veranschaulicht: Tropfen beim Durchgang durch Einzellamellen und Lamellensysteme sowie beim Eindringen in reale Schaumsysteme. (Hochfrequenzaufnahmen bis zu 10.000 B/s).
 Prod.: 1987/88, 1995, Publ.: 1997
 Format: Video ; F, 11 1/2 min

Sprache: de, en, Orig.
Herst./Veröff.: IWF (Göttingen)
Verleih: Video, Verkauf: VHS
Bestellnummer: **B 1951**
Preis: DM 49,- Video (VHS-Pal)