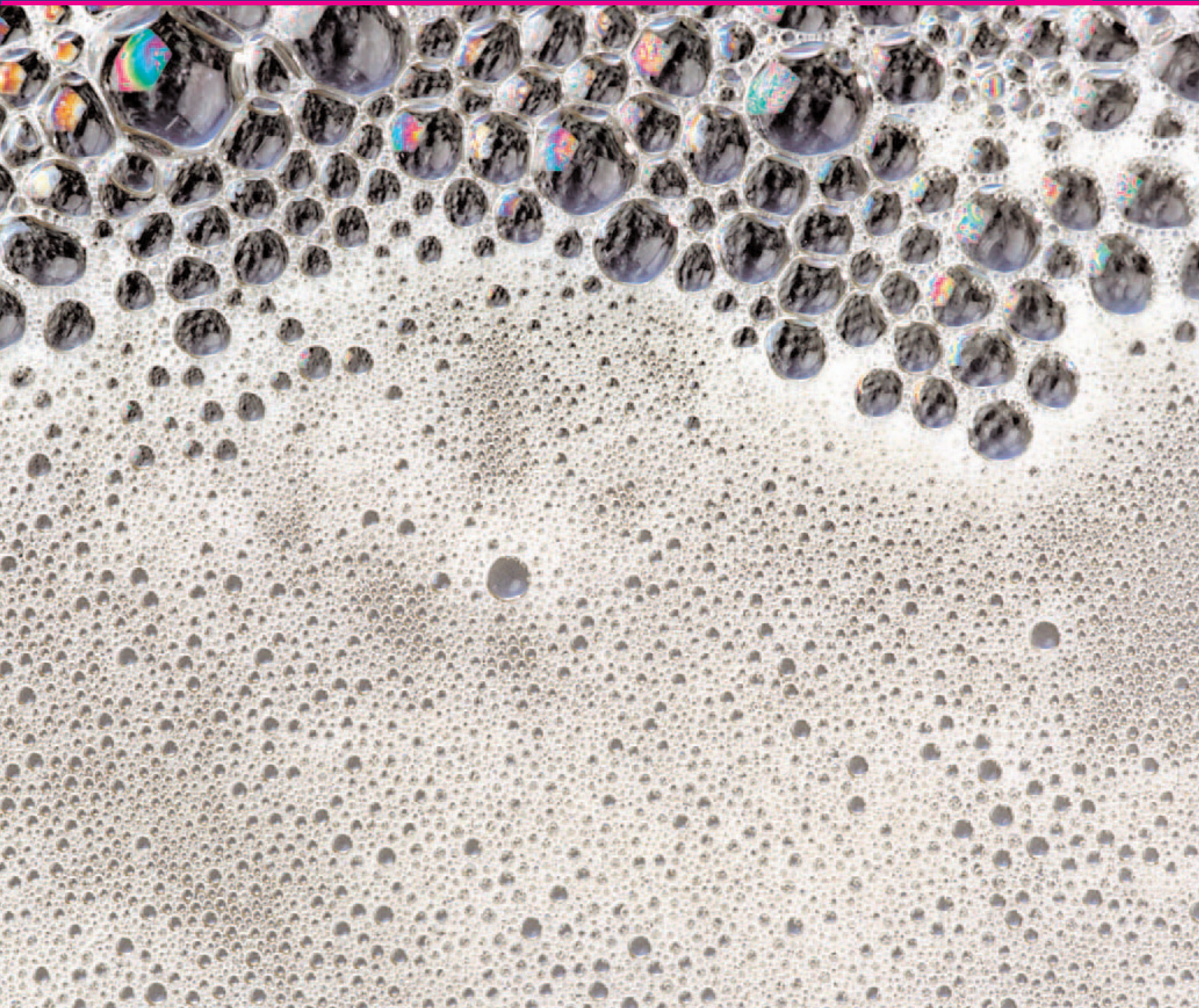


Schaum

- erzeugen, regulieren, zerstören
- prüfen und bewerten

Dezember 2015





Schaumbroschüre TEGEWA Arbeitsgruppe „Grenzflächenaktive Substanzen“*

*Mitglieder:

Dr. Wolfgang Brennich,
Zschimmer & Schwarz GmbH & Co. KG,
56112 Lahnstein

Dr. Britta Jakobs-Sauter,** 45764 Marl
Rolf-Dieter Kahl,** 67056 Ludwigshafen

Drs. Hamke Meijer,**
46422 Emmerich

Dr. Dennis Miller,
Clariant Produkte (Deutschland) GmbH,
65926 Frankfurt

Dr. Renke Rommerskirchen,
Sasol Germany GmbH, 45772 Marl

Dr. Natascha Schelero,
Clariant Produkte (Deutschland) GmbH,
65926 Frankfurt

Dr. Kati Schmidt,
BASF SE, 67056 Ludwigshafen

Dr. Jörg Andreas Schröter,
Ecogreen Oleochemicals GmbH,
06861 Dessau-Roßlau

Dr. Wolfgang Spiegler,**
67056 Ludwigshafen

Dr. Michael Stapels,
KaoChemicals GmbH, 46446 Emmerich

Dr. Rainer Traber,**
CH-4002 Basel

Dr. Joachim Venzmer,
Evonik Nutrition & Care GmbH, 45127 Essen

** ehemalige Mitglieder der Arbeitsgruppe

Inhalt

1. Ziele der Broschüre	4
2. Theoretische Grundlagen	5
3. Tenside	12
4. Entschäumer	15
5. Schaum in der Praxis	19
5.1 Stark schäumende Systeme	19
Flüssige Körperreinigungsmittel	19
Haarfestigerschaum	20
Rasierschaum	21
Handgeschirrspülmittel	22
Schaumreiniger für harte Oberflächen	22
Beschichtung textiler Flächen	24
Flotation	25
Löschschaum	26
Lebensmittel	27
5.2 Schwach schäumende Systeme	28
Waschmittel	28
Automatische Geschirreinigung	30
Industrielle Flaschenwäsche	31
Reiniger für den gewerblichen Bereich	32
5.3 Schaumfreie Systeme	33
Herstellung von Papierfasern	34
Faserherstellung aus Holz	34
Faserherstellung aus Altpapier	34
Herstellung der wässrigen Fasersuspension (Pulpe)	35
Papierherstellung	35
Textilvorbehandlung	36
Textilfärbung	38
Textildruck und Textilausrüstung	39
Metallbearbeitung	40
Wässrige Lacksysteme	41
Zuckerherstellung	42
6. Schaumprüfmethode	43
7. Literatur	51
8. Glossar	52

1. Ziele der Broschüre

In vielen Prozessen, sei es im Haushalt oder im industriellen Bereich, spielt Schaum eine wichtige Rolle. Dabei kann das Entstehen von Schaum erwünscht sein und – wie bei der „Bierblume“ oder auch beim Haarshampoo – ein charakteristisches Produktmerkmal darstellen. Vielfach leistet der Schaum auch einen wichtigen Beitrag zur Performance der Produkte, so beispielsweise in Wasch- und Reinigungsmitteln. In anderen Fällen dagegen – wie etwa bei der Textil- und Papierherstellung – stört Schaum ganz empfindlich und muss daher vollständig und sicher vermieden werden.

Schaum wird also je nach Bedarf möglichst gezielt erzeugt, gesteuert oder zerstört, seine Qualitäten und Eigenschaften werden den Anforderungen entsprechend eingestellt. Dies eröffnet in zahlreichen Anwendungsgebieten und Industrien, in denen Grenzflächeneffekte und grenzflächenaktive Substanzen von Bedeutung sind, vielfältige Möglichkeiten zur Entwicklung neuer und verbesserter Produkte und Herstellverfahren. Hierzu ist zum einen ein grundlegendes Verständnis der physikalischen und molekularen Vorgänge der Schaumbildung und des Schaumverhaltens erforderlich, zum anderen aber auch die Fähigkeit, anwendungsorientierte Fragestellungen mit Hilfe geeigneter Labormethoden untersuchen und möglichst wirklichkeitsnah simulieren zu können. Nicht zuletzt kommt hier der Auswahl geeigneter Schaumprüfmethode eine wichtige Rolle zu.

Die Komplexität des Themas „Schaum“ mit seinen vielfältigen Ausprägungen hat inzwischen jedoch zu einer kaum noch überschaubaren

Anzahl von Prüfmethode geführt, die zwar oft ähnliche Aussagen liefern, aber nur bedingt vergleichbar sind. Eine Bestandsaufnahme und ein Vergleich der in den verschiedenen Arbeitsgebieten verwendeten Prüfmethode scheint uns daher hilfreich zu sein.

Standardisierte Prüfmethode erleichtern es, Produkte und deren Eigenschaften in definierter Weise zu charakterisieren und die Daten industrieweit effizient zu kommunizieren. Die ständige Weiterentwicklung der Methoden und die fortschreitende Automatisierung der Labortechnik machen es daher notwendig, den Bedarf an einer weiteren Standardisierung und Normung von Prüfmethode frühzeitig zu erkennen und ihm Rechnung zu tragen.

Ziel dieser Broschüre ist es, das Phänomen „Schaum“ sowohl theoretisch als auch anwendungsbezogen zu beschreiben und die Anforderungen und Problemlösungen in unterschiedlichen Anwendungssegmenten anschaulich darzustellen. Sie richtet sich daher in erster Linie an Produktentwickler und Anwendungstechniker im Labor. Aber auch Verfahrenstechnikern, die Schaumphänomene bei der Ausarbeitung und Steuerung von Prozessen zu berücksichtigen haben, und Praktikern im Betrieb, die möglicherweise bei Prozessstörungen mit Schaumproblemen konfrontiert werden, kann sie wertvolle Hilfestellung bieten.

Nach einer theoretischen Einführung in das Thema „Schaum“ werden Eigenschaften und Verwendung sowohl von Tensiden als auch Entschäumern beschrieben. Dem gezielten Einsatz dieser grenzflächenaktiven Substanzen

kommt bei der Schaumerzeugung und -kontrolle ebenso wie bei der Einstellung spezieller Schaumeigenschaften eine entscheidende Rolle zu.

Es folgt eine Beschreibung des Phänomens „Schaum“ und seiner vielfältigen Facetten anhand von Beispielen aus der Praxis. Sie reichen von stark schäumenden Systemen, in denen Schaum von ganz spezieller Qualität verlangt wird, über schwach schäumende Systeme mit gezielt reguliertem und niedrig gehaltenem Schaumvolumen bis hin zu schaumfreien Systemen, in denen Schaum unerwünscht ist und deshalb vermieden oder zerstört werden muss.

Nach einer Diskussion allgemeiner Aspekte zu Schaumprüfmethoden folgt im abschließenden Kapitel eine zusammenfassende Darstellung der in den einzelnen Anwendungsgebieten gängigen Prüfmethoden. Die in der Praxis in großer Zahl für spezielle anwendungstechnische Fragestellungen genutzten Tests konnten in der Broschüre nicht berücksichtigt werden, weil dies den vorgesehenen Rahmen gesprengt hätte. Außerdem musste die Thematik auf flüssige Schäume begrenzt bleiben. Wässrige Schäume stehen dabei, ihrer praktischen Bedeutung entsprechend, im Vordergrund.

2. Theoretische Grundlagen

Einleitung

Schaum kann als eine Dispersion von Gas in einer Flüssigkeit definiert werden, in der das Volumen des Gases überwiegt. Schäume sind thermodynamisch nicht stabil und zerfallen allmählich. Die Zeitskala, in der dies geschieht, variiert stark: Kurzlebige, durch kleine grenzflächenaktive Moleküle stabilisierte Schäume können in wenigen Sekunden zerfallen. Schäume, die durch Polymere oder Tenside stabilisiert werden, bestehen über Stunden oder sogar Tage. Bei der Mehrzahl der aus der Praxis bekannten Schäume handelt es sich um wässrige Systeme.

Schaumstruktur

Es gibt zwei typische Schaumstrukturen, die als Grenzfälle betrachtet werden können.

■ Kugelschaum

Diese Struktur mit kugelförmigen Gasblasen ist typisch für Schäume mit einem hohen Flüssigkeitsgehalt und liegt gewöhnlich unmittelbar nach der Schaumbildung vor.

■ Polyederschaum

Hier werden polyedrische Gasblasen von dünnen Flüssigkeitsfilmen getrennt. Diese Struktur, die in Abb. 1 gezeigt wird, bildet sich aus, wenn der Schaum entwässert ist. Das Volumen der Flüssigkeit kann dabei sehr klein werden. Dabei treffen drei Filmlamellen in einem Winkel von 120° aufeinander und bilden den so genannten „Plateaukanal“ (benannt nach dem belgischen Physiker Joseph Plateau, 1801-1883).

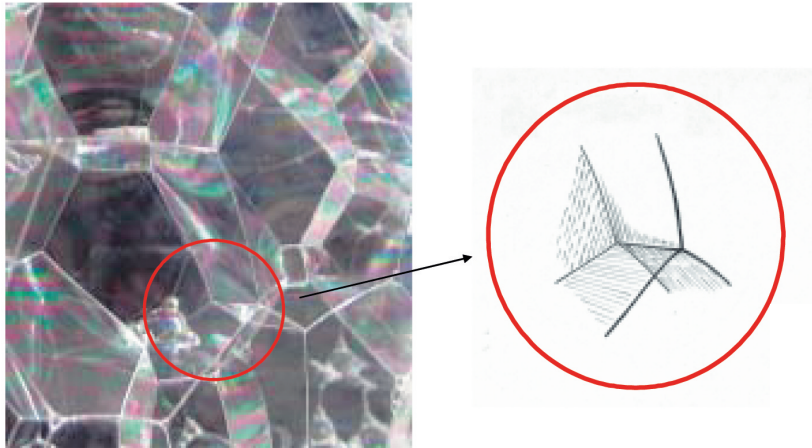


Abb. 1
Schaumstruktur (Polyederschaum);
Foto: Clariant

Die Drainage der Flüssigkeit verursacht einen allmählichen Übergang vom Kugelschaum in den Polyederschaum. Dünne Filme, wie zu beobachten in Schäumen und Seifenblasen, weisen häufig Interferenzfarben auf. Dies zeigt, dass sie in ihrer Dicke vergleichbar sind mit der Wellenlänge des Lichts. Bei dünneren Filmen sind diese Farben nicht zu beobachten.



Abb. 2
Struktur einer „Schaumschicht“

Abb. 2 zeigt beide Strukturen in einer Schaumschicht. In viskosen Flüssigkeiten verläuft die Drainage langsam und begünstigt dort die Ausbildung der Kugelschaumstruktur.

Schaumbildung und -zerstörung

Die Fähigkeit des Schaums, sich zu bilden, wird als Schaumbildungs- oder Schäumvermögen bezeichnet. Dies zeigt die kurzfristige Stabilität dünner Filme. Schaumbildung bedeutet auch die Bildung einer neuen Oberfläche. Die dafür benötigte Energie steht in Zusammenhang mit der Oberflächenspannung. Die dynamische Oberflächenspannung ist, eher als die statische, der relevante Parameter für Korrelationen mit der Schäumbarkeit.

Schaum ist nicht thermodynamisch stabil. Sobald er sich einmal gebildet hat, zerfällt er wieder innerhalb von Minuten oder Stunden.

In einer statischen Schaumsäule wurde die Schaumentstehung gestoppt. Die Drainage führt zu einer Abnahme des Flüssigkeitsvolumens im Schaum. Gleichzeitig brechen die dünnen Lamellen nach und nach, so dass der Schaum zerfällt. Dies führt sowohl zu einer Änderung der Schaumstruktur als auch zu einer Abnahme des Schaumvolumens. Die Zerfallsskinetik kann durchaus komplex sein. Möglich ist beispielsweise eine Zeitspanne ohne sichtbare Veränderung, gefolgt von graduelltem Zerfall. Manchmal wird ein katastrophaler Zusammenbruch beobachtet.

Dynamische Schaumsäulen liegen zum Beispiel dann vor, wenn Schaum durch Einblasen von Luft, Zirkulation oder Versprühen erzeugt wird. Dabei wird nach einer bestimmten Zeit ein Gleichgewichtszustand erreicht.

Stabilisierungs- und Zerfallsmechanismen

Reine Flüssigkeiten schäumen nicht, weil dünne Filme nicht ohne eine an der Oberfläche adsorbierte Schicht stabilisiert werden können. Zur Stabilisierung des Schaums ist eine oberflächenaktive Substanz erforderlich, die jedoch nicht unbedingt ein konventionelles Tensid sein muss. Abhängig vom Typ und der Konzentration des Stabilisators kann die adsorbierte Schicht entweder mobil oder immobil sein. Immobile Schichten, die für Polymere typisch sind, neigen dazu, stabilere Schäume zu ergeben.

Schaumstabilität und -zerfall werden durch eine Vielzahl von Mechanismen beeinflusst. Einige davon betreffen die dünnen Filme an sich, während bei anderen die Verbindungsstellen zwischen den Filmen eine wichtige Rolle spielen.

a) Dünne Filme

Dünne Filme dieser Art können sich auf Drahtgittern oder als Seifenblasen ausbilden. Stabile Schäume entstehen nur dann, wenn die dünnen Flüssigkeitsfilme gegen Bruch ausreichend stabil sind. In der Grundlagenforschung gibt es viele Arbeiten mit dünnen Filmen. Hier konnte belegt werden, dass es verschiedene Mechanismen gibt, durch die sie stabilisiert werden:

■ Gibbs-Marangoni Mechanismus [1].

Betrachten wir den Fall einer Ausdehnung des Films unter Vergrößerung der Oberfläche und Reduzierung der Filmdicke, wie in Abb. 3 dargestellt.

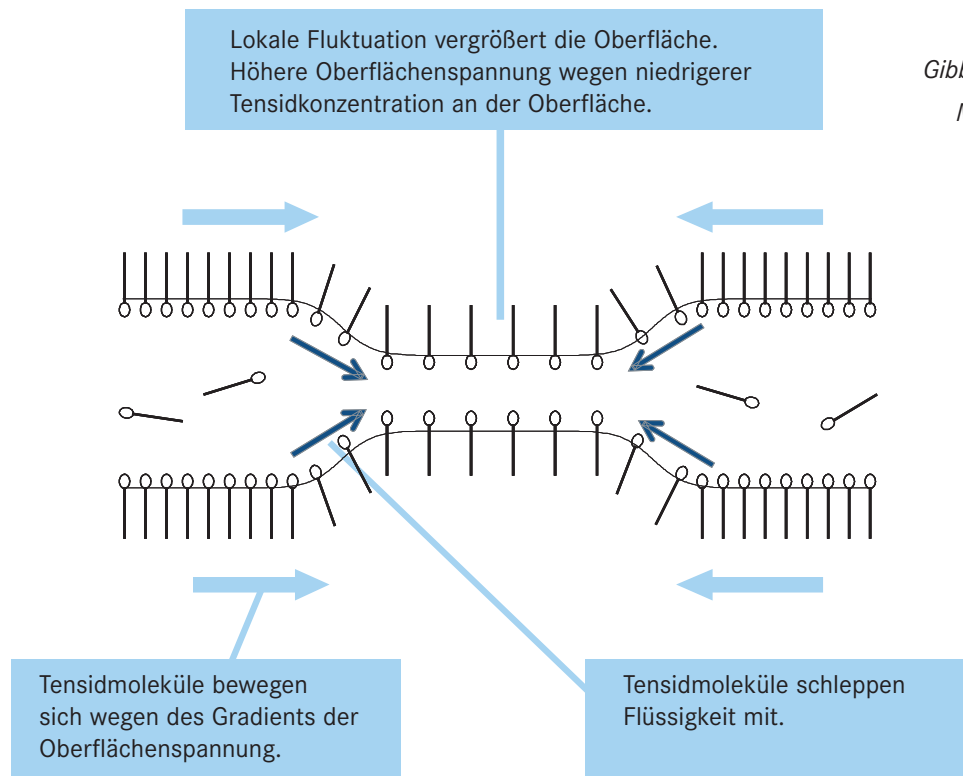


Abb. 3
Gibbs-Marangoni
Mechanismus

Durch die Ausdehnung des Films wird die Belegung der Grenzfläche durch das Tensid herabgesetzt, wodurch die Oberflächenspannung steigt. Der Gradient der Oberflächenspannung führt zu Transportprozessen, die dazu beitragen, dass der Defekt wieder repariert wird. Ein wichtiger Aspekt dieses Reparaturmechanismus ist, dass die Tensidmoleküle bei ihrer Bewegung Flüssigkeit mit sich schleppen, in den dünneren Teil des Films eintragen und dadurch die Filmdicke wieder erhöhen. Der Gibbs-Marangoni Mechanismus ist am wirksamsten bei mittleren Tensidkonzentrationen. Wenn zu wenig Tensid vorhanden ist, sind die Diffusionszeiten lang, und die Grenzfläche wird nur teilweise belegt. Bei hohen Tensidkonzentrationen ist die Adsorption aus der Lösung hingegen schnell. Diese erfolgt dann in höherem

Maße auch innerhalb des dünnen Teils des Films, was den Gradienten der Oberflächenspannung reduziert und den Transportprozess entlang der Filmoberfläche einschränkt.

■ Oberflächenviskosität

Intermolekulare Wechselwirkungen in adsorbierten Tensidschichten wirken der Bewegung der benachbarten Moleküle entgegen. Dies führt zu einer Oberflächenviskosität, die als zweidimensionales Analogon zur normalen dreidimensionalen Viskosität von Stoffen angesehen werden kann.

■ Oberflächenelastizität

Wenn Tensidmoleküle starke Wechselwirkungen untereinander ausüben, besitzen die entsprechenden Filme neben hohen Oberflächenviskositäten auch starke elastische Eigenschaften.

Beide Effekte, höhere Elastizität und Viskosität, führen zu einer Stabilisierung der Filme und der Schaumstrukturen.

■ Sterische und elektrostatische Abstoßung

In ionischen Systemen trägt die Abstoßung zwischen elektrischen Doppelschichten zur Stabilität des Films bei. Sterische Wechselwirkung zwischen großen Kopfgruppen, wie z. B. Polyethylenglykolen oder adsorbierten Polymeren, können ebenfalls verhindern, dass die Lamellen zusammenbrechen. Van der Waals-Kräfte wirken in die umgekehrte Richtung und destabilisieren den Film.

■ Flüssige Mikrostrukturen

Oberhalb eines bestimmten Konzentrationsbereiches (die so genannte Mizellbildungskonzentration: cmc) aggregieren Tenside in der Flüssigphase. In dünnen Filmen kann die Aggregation in Schichten stattfinden. Abstoßungskräfte zwischen den Aggregaten und der Grenzfläche helfen, ein Ausdünnen der Lamellen zu verhindern. Bei hohen Tensidkonzentrationen können flüssigkristalline Schichtstrukturen auftreten [2], welche die Drainage verlangsamen und so zur Stabilität beitragen.

b) Schäume

In einem Schaum gibt es eine Vielzahl weiterer Phänomene, die dessen Stabilität beeinflussen können.

■ Plateaukanal-Unterdruck

Wegen der Krümmung des Films an den Plateaukanälen ist dort der Druck niedriger als

im Film. Dies ergibt sich aus der Laplace-Gleichung, die die Abhängigkeit zwischen Druck, Oberflächenspannung und Krümmung wiedergibt. Abb. 4 zeigt den Durchschnitt senkrecht zum Plateaukanal. Betrachtet man die Oberfläche aus der Mitte des Plateaukanals, so ist sie konvex. Daraus folgt, dass in diesem Bereich ein negativer Krümmungsradius in die Laplace-Gleichung eingesetzt werden muss.

Die Flüssigkeit fließt aus dem Film in die Plateaukanäle und die Lamellen werden nach und nach dünner. Dabei können sie einen metastabilen Zustand erreichen, in dem die Abstoßung zwischen den Filmoberflächen, der so genannte Trenndruck, die Drainage-Kräfte ausgleicht [3]. Die Drainage in Filmen wird durch höhere Viskositäten erniedrigt.

■ Bewegliche Filme

In beweglichen Filmen können sich dünne Bereiche bilden, die die Tendenz haben, sich nach oben zu bewegen, ein Phänomen, das als „marginal regeneration“ bekannt ist.

■ Fließen unter Schwerkraft

Auch das einfache Abfließen der Flüssigkeit, ihrer Schwerkraft folgend durch die Plateaukanäle nach unten, trägt in erheblichem Maße zur Entwässerung des Schaums bei.

■ Verdampfung des Lösungsmittels

Schäume in offenen Behältern verdampfen langsam. Dies führt zur Bildung dünnerer Filme, besonders an der Oberseite des Schaums.

■ Ostwald-Reifung

Der Gasdruck in kleinen Blasen ist höher als in großen. Kann Gas durch die Lamellen diffundie-

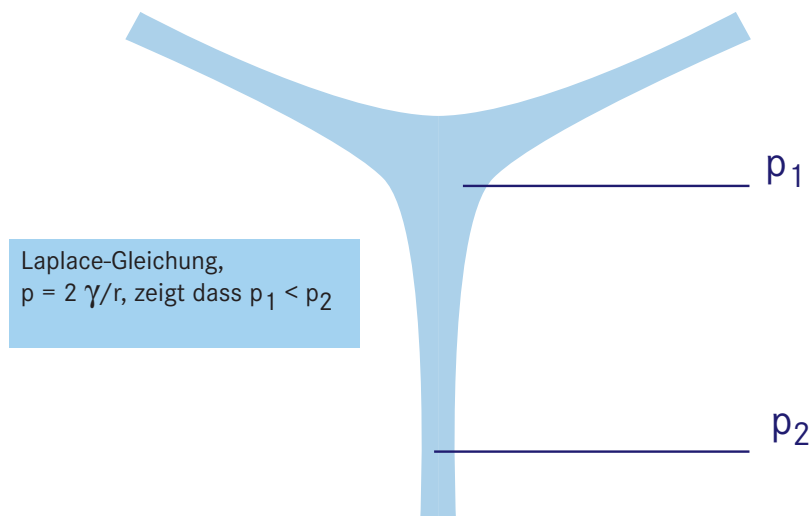


Abb. 4

Saugwirkung eines Plateaukanals:

p = Druck,

γ = Oberflächenspannung der schäumenden Flüssigkeit,

r = Krümmungsradius.

ren, werden große Blasen auf Kosten der kleinen wachsen. Dies ist vornehmlich dann von Interesse, wenn das Gas eine hohe Löslichkeit hat, wie beispielsweise CO_2 .

■ Partikel

Feste Partikel können zur Stabilisierung beitragen, so beispielsweise bei den Schäumen in der Erzflotation. Als Mechanismus wurde vorgeschlagen, dass der Flüssigkeitsabfluss durch solche Partikel reduziert wird [4]. Trotzdem können kleine Mengen hydrophober Partikel die Lamellen durchbrechen und den Schaum zerstören, wie im Abschnitt "Entschäumer" dargestellt.

Weitere Einflussgrößen auf die Schaumbildung und Schaumstabilisierung

Wenn Gas und Flüssigkeit gemischt werden, bilden sich Blasen, die durch hydrodynamische Kräfte aufgebrochen werden. Schaum bildet sich dann, wenn ein Stabilisator die schnelle Koaleszenz verhindert. Das Ausmaß der Schaumbildung hängt sowohl von der Menge des Gases ab, das in die Flüssigkeit eingemischt wird, als auch von der mechanischen Beanspruchung des Systems (Scherrate). Mit einigen Testmethoden ist es möglich, diese Parameter systematisch zu variieren. In den meisten Fällen sind sie jedoch nicht klar definiert, obwohl die qualitativen Unterschiede meistens deutlich sind. Es ist deshalb schwierig, Schäume, die nach unterschiedlichen Methoden hergestellt wurden, miteinander zu vergleichen.

Schaum kann auch durch Keimbildung von Gasblasen in einer übersättigten Lösung erzeugt werden. Dieser Mechanismus ist insbesondere bei kohlenensäurehaltigen Getränken von Bedeutung.

Obwohl eine Absenkung der Oberflächenspannung normalerweise eine Voraussetzung für das Schäumen ist, gibt es keinen generellen Zusammenhang zwischen dem Ausmaß des Schäumens und der statischen Oberflächenspannung. Da es sich hier um sehr kurze Zeitskalen handelt, ist eine Korrelation mit der dynamischen Oberflächenspannung wahrscheinlicher. Dies wurde in einigen grundlegenden Untersuchungen auch beobachtet [5,6].

Bei den Schaumstabilisatoren können folgende Klassen unterschieden werden:

■ Kleine oberflächenaktive Moleküle

Beispiele dieses Typs sind kurzkettige Alkohole und Carbonsäuren. Sie ergeben kurzlebige Schäume. Im Allgemeinen geht die Schaumstabilität mit zunehmender Konzentration durch ein Maximum. Dies ist über den Gibbs-Marangoni Mechanismus erklärbar. Mit kürzerer Kettenlänge wird bei geringerer Konzentration das Maximum im Schaumbildungsvermögen erreicht.

■ Mizellbildende Tenside

Typische Tenside ergeben stabile Schäume. Die Lebensdauer des Schaums nimmt mit der Menge des Tensids zu und erreicht bei hohen Konzentrationen einen Grenzwert.

■ Polymere

Polymere mit amphiphilen Eigenschaften können sehr gute Schaumstabilisatoren sein. Ein bekanntes Beispiel ist Eiweiß in Bier.

■ Teilweise mischbare Flüssigkeiten

Flüssige Systeme mit einer Zusammensetzung nahe der Phasentrennung sind oberflächenaktiv. Die Tendenz, Schaum zu bilden, nimmt zu, je mehr man sich der Phasengrenze „nähert“. [7]

Nichtwässrige Schäume

Nichtwässrige Schäume sind insbesondere in Prozessen der chemischen und ölverarbeitenden Industrien von Bedeutung - und dort meistens unerwünscht. So können sie zum Beispiel Probleme in Destillationskolonnen [8], bei der Ölproduktion [9] und bei Brenn- und Treibstoffen auf Kohlenwasserstoff-Basis [10] verursachen. In mancher Hinsicht gelten sowohl für wässrige als auch für nichtwässrige Systeme dieselben Prinzipien. Die Viskosität der Flüssigkeit und der Grenzfläche spielt bei Kohlenwasserstoff-Schäumen vermutlich eine wichtige Rolle.

3. Tenside

Tenside haben sowohl auf die Schaumbildung als auch auf die Schaumqualität einen wesentlichen Einfluss. Dabei stellt sich in der Praxis die Frage, welches Tensid für welche Anwendung die „richtigen“ Schaumeigenschaften erzeugt.

Generell sind manche Tensidklassen als stark, andere als schwach schäumend bekannt. Einen Überblick gibt die folgende Tabelle mit einer groben Einteilung der wichtigsten Tensidklassen in starke, mittlere und schwache Schaumbildner.

Tensid-Typ		Schäumvermögen	Bemerkungen
ANIONISCHE TENSIDE	Alkylbenzolsulfonate	stark	
	Alkoholsulfate	stark	Stabil gegen Wasserhärte
	Alkansulfonate	stark	
	Isethionate	stark	
	Olefinsulfonate	stark	
	Sarcosinate	stark	
	Seifen	mittel	Entschäumer in hartem Wasser
	Alkylethercarboxylate	mittel	Stabil gegen Wasserhärte
	Sulfosuccinate	mittel	
NIGHTIONISCHE TENSIDE	Alkanolamide	stark	Schaumbooster
	Aminoxide	stark	Schaumbooster
	Fettaminethoxylate	stark	Oberhalb Trübungspunkt: niedrig/Entschäumer pH-abhängig.
	Alkypolyglucoside	stark	Schaumbooster
	Fettalkoholethoxylate	mittel	Oberhalb Trübungspunkt: niedrig/Entschäumer
	Fettalkoholalkoxylate (Fettalkohol + EO/PO)	schwach	Oberhalb Trübungspunkt: sehr niedrig/Entschäumer
	EO/PO Blockpolymere	schwach	Oberhalb Trübungspunkt: sehr niedrig/Entschäumer
	Sorbitanester	schwach	U. a. Verwendung in Lebensmitteln
KATIONISCHE TENSIDE	Di- und Trialkylammoniumsalze	schwach	Schaum im Allgemeinen nicht stabil
	Esterquats	schwach - mittel	
AMPHOTERE TENSIDE	Betaine	stark	Aber weniger als anionische Tenside

Diese Gliederung gibt die typischen Eigenschaften dieser Tensidklassen in Relation zueinander wieder. Details der chemischen Struktur der einzelnen Tenside, wie beispielsweise Länge und Verzweigung der Alkylketten, können allerdings einen großen Einfluss auf die filmstabilisierenden bzw. -destabilisierenden Mechanismen (siehe Kap. 2 und 4) und damit auf das Schaumverhalten haben. Daher ist es nicht möglich, ganzen Tensidklassen allgemein gültige, detaillierte Schaumeigenschaften zuzuordnen. So zeigen z. B. Aminoxide und Alkylpolyglucoside mit kurzen Alkylketten (<C 10) ein geringeres Schäumvermögen als manche Alkoholethoxylate, während längererkettige Derivate stark schäumen und als Schaumbooster eingesetzt werden.

Umgekehrt sind auch Aussagen über Zusammenhänge zwischen chemischer Struktur und Schaumverhalten nur innerhalb einer Klasse von Tensiden des gleichen Strukturtyps möglich, wie folgende Beispiele belegen:

- Es ist bekannt, dass bei linearen Alkylsulfaten das Schäumvermögen mit wachsender C-Kettenlänge ansteigt und bei einer Kettenlänge von C16 ein Maximum erreicht. Verzweigungen im Alkylrest reduzieren das Schäumvermögen deutlich.
- Bei Alkoholethoxylaten wird das Schaumverhalten stark durch die Länge der Polyethylenglykol(PEG)-Kette beeinflusst. Das Schäumvermögen ist bei kurzen PEG-Ketten schwach und zeigt einen markanten Anstieg, wenn mit zunehmender PEG-Kettenlänge die

Wasserlöslichkeit des Tensids erreicht wird. Bei längeren PEG-Ketten ist die Veränderung nur noch gering.

- Alkoholethoxylate mit kurzen PEG-Ketten enthalten herstellungsbedingt Restmengen an nicht ethoxyliertem Alkohol. Dieser Anteil an freiem Alkohol, der als Entschäumer wirkt, ist insbesondere bei niedrig ethoxylierten Produkten hoch und stellt einen weiteren Grund für deren geringes Schäumvermögen dar.
- Bei vergleichbarem HLB-Wert ergeben Alkoholethoxylate mit längeren C-Ketten einen stabileren Schaum. Das Schaumvolumen ist jedoch in der Regel kleiner.
- Betrachtet man den Abfall des Schäumvermögens bei Überschreiten des Trübungspunktes, so ist er bei längeren C-Ketten deutlich stärker ausgeprägt als bei kürzeren.
- Kürzererkettige Alkohole verleihen dem Tensid eine höhere Dynamik. Daraus resultiert ein verbessertes Anschäumverhalten, d. h. eine schnellere Schaumbildung.
- Ein höherer Verzweigungsgrad im Alkylrest führt bei Alkoholethoxylaten tendenziell zu einem stärkeren Schäumvermögen und zu einem schwerer zerstörbaren Schaum.

Neben diesen Struktur-Wirkungsbeziehungen sind folgende Zusammenhänge zwischen den physikalischen Daten von Tensiden und deren Schaumverhalten von Bedeutung:

- Schaumbildung und Schaumstabilität nehmen unterhalb der kritischen Mizellbildungskonzentration (cmc) mit steigender

Tensidkonzentration zu und erreichen in der Nähe der cmc entweder ein Plateau oder ein Maximum.

- Auch die Anschäumgeschwindigkeit nimmt unterhalb der cmc mit steigender Tensidkonzentration zu. Dabei besteht eine gute Korrelation mit der dynamischen Oberflächenspannung.
- Die Wirksamkeit nichtionischer Schaumbooster für anionische Tenside scheint in manchen Systemen mit einer Absenkung der cmc zu korrelieren [11].
- Bei Seifen nimmt das Schäumvermögen mit zunehmender Wasserhärte ab. In hartem Wasser wirken sie unter Bildung unlöslicher Calciumsalze (Kalkseifen) als Entschäumer (s. Kap. 4).
- Die Wasserlöslichkeit von nichtionischen Tensiden und damit auch deren Schaumverhalten ist stark temperaturabhängig. Oberhalb ihres Trübungspunkts schäumen Alkoholethoxylate nur schwach oder wirken sogar entschäumend. Dieses Phänomen beruht auf der Entmischung in eine wässrige tensidarme und eine tensidreiche Phase. Letztere scheidet sich in Form kleiner Tröpfchen ab (und bewirkt damit auch die Eintrübung), die, ähnlich wie Öle, als Entschäumer wirken [12] (s. Kap. 4).
- Alkoholalkoxylate, wie z. B. Alkohol-EO-PO-Addukte, sind dabei aufgrund ihrer flacheren Trübungspunktkurve im Allgemeinen schwächere Schäumer bzw. stärker wirksame Entschäumer als die entsprechenden Ethoxylate [13].

Neben den genannten Produktklassen gibt es eine ganze Reihe weiterer industriell hergestellter Spezialtenside und darüber hinaus eine Vielzahl in der Natur vorkommender Tenside mit zum Teil wichtigen biologischen Funktionen. Diese „Biotenside“ gehören vor allem den Produktklassen der Glycolipide, Phospholipide (wie Lecithin), Lipoproteine (Gallensäuren) und der Glykoside (Saponin) an. Von Proteinen und Fetten als Schaumstabilisatoren wird bei der Herstellung von Lebensmitteln Gebrauch gemacht (s. Kap. 5.1).

4. Entschäumer

Ein Entschäumer soll die Entstehung von Schaum verhindern oder gebildeten Schaum effizient zerstören. In diesem Sinne kann zwischen Schauminhibitoren (Antischaummittel) und Entschäumern unterschieden werden. Soll die Schaumunterdrückung nur partiell und nicht vollständig erfolgen, spricht man auch von Schaumregulatoren, die außer zur Steuerung des Schäumvermögens auch zur Beeinflussung anderer Schaumeigenschaften dienen können. Der Einfachheit halber werden in diesem Kapitel alle Substanzen, die zur Reduzierung der Schaumbildung eingesetzt werden, unter dem Begriff „Entschäumer“ zusammengefasst.

Da die Schaumstruktur durch eine möglichst homogene und dichte Belegung der Flüssigkeitsoberfläche mit Tensiden stabilisiert wird, erzielen Entschäumer dann eine gute Wirkung, wenn sie diese Struktur zerstören oder deren Bildung verhindern. Ein effizienter Entschäumer muss daher folgende Anforderungen erfüllen:

- höhere Oberflächenaktivität, d. h. stärkere Reduzierung der Oberflächenspannung als das schaumverursachende Tensid.
- Unlöslichkeit im schäumenden Medium, da er sonst selbst als Tensid, d. h. schaumbildend und -stabilisierend, wirken würde.
- Ausreichende Dispergierbarkeit. Typische Tropfengröße 5 – 10 µm.

Als Entschäumer für wässrige Systeme werden in der Regel hydrophobe Öle oder Kombinationen von hydrophoben Ölen und hydrophoben, feindispersen Festkörpern eingesetzt.

Mechanismen

Die Wirkung eines Antischaummittels beruht auf dessen Unlöslichkeit und Oberflächenaktivität. Dies veranlasst Tropfen, an die Grenzfläche Flüssigkeit/Luft zu wandern und in diese einzudringen. Der Eindringkoeffizient E, der größer Null sein sollte, ergibt sich aus folgender Gleichung.

$$E = \gamma_s + \gamma_{se} - \gamma_e$$

γ_s = Oberflächenspannung der schäumenden Flüssigkeit

γ_{se} = Grenzflächenspannung zwischen schäumender Flüssigkeit und Entschäumer

γ_e = Oberflächenspannung des Entschäumers

Es ist zu erkennen, dass E umso größer wird, je größer die Oberflächenspannung des schäumenden Mediums und die Grenzflächenspannung zwischen schäumender Flüssigkeit und Entschäumer ist. Gleichzeitig wird E umso größer, je niedriger die Oberflächenspannung des Entschäumers ist. Sobald der Entschäumer tropfen in die Grenzfläche eingetreten ist, beginnt er auf ihr zu spreiten, falls der Spreitungskoeffizient S ebenfalls größer Null ist.

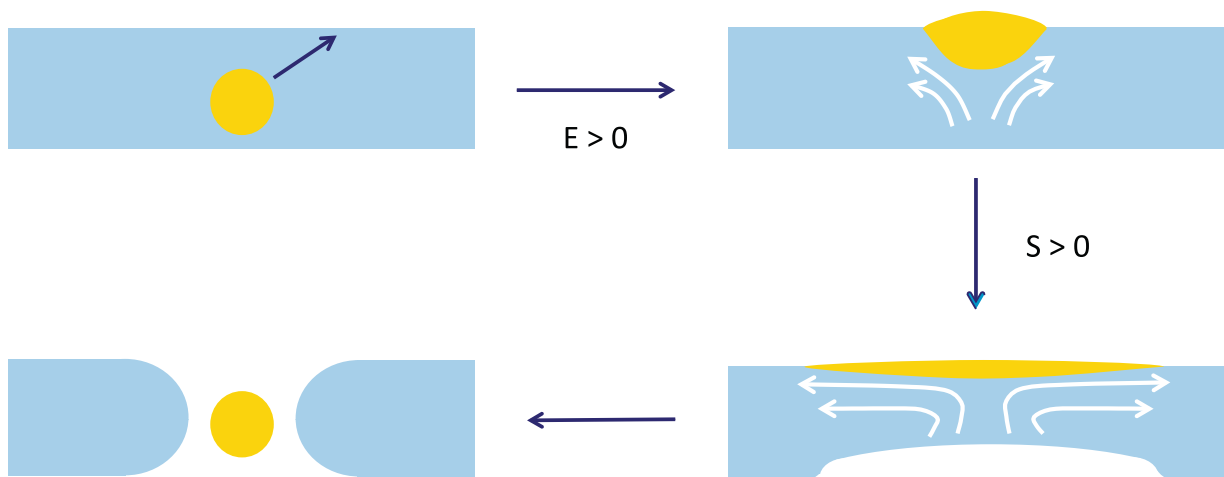
$$S = \gamma_s - \gamma_{se} - \gamma_e$$

γ_s = Oberflächenspannung der schäumenden Flüssigkeit

γ_{se} = Grenzflächenspannung zwischen schäumender Flüssigkeit und Entschäumer

γ_e = Oberflächenspannung des Entschäumers

Die Spreitung des Tropfens führt zur Destabilisierung und schließlich zum Reißen der Schaumlamelle (Abb. 5). Eine detaillierte Darstellung des Mechanismus gibt es in der entsprechenden Fachliteratur [14].



- Entschäumer müssen im schäumenden Medium unlöslich sein
- Entschäumer müssen eine niedrige Oberflächenspannung haben
- $E > 0$ (notwendig)
- $S > 0$ (bevorzugt)

Abb. 5

Entschäumungs-Mechanismus von
hydrophoben Ölen

Öle

Die Hauptkomponenten von Entschäumern sind hydrophobe Öle, beispielsweise Mineralöle, Paraffinöle, Fettalkohole und ihre Ester, Fettsäuren und Silikonöle.

Entschäumer auf Basis von Ölen mit Kohlenwasserstoffketten weisen eine Oberflächenspannung von ca. 30 mN/m auf und haben den Vorteil einer guten Verträglichkeit in wässrigen Systemen. Silikonöle sind Polydimethylsiloxane (PDMS) mit einer sehr niedrigen Oberflächenspannung von ca. 22 mN/m. Aus diesem Grund

ist ihre Effizienz ausgezeichnet. Allerdings sind sie in der Regel mit wässrigen Systemen unverträglich, was zu Störungen in einigen Anwendungen führen kann. Um die positiven Eigenschaften von organischen Entschäumern (gute Verträglichkeit) und Silikon-Entschäumern (hohe Effizienz) miteinander zu verbinden, werden Silikonöle mit geeigneten Substituenten modifiziert. Diesen organomodifizierten Siloxanen liegt ebenfalls ein Polysiloxangerüst zugrunde, das die gewünschte Verringerung der Oberflächenspannung gewährleistet.

Hydrophobe Festkörper

Feste Teilchen mit geeigneten Benetzungseigenschaften können ebenfalls zum Aufbrechen der Schaumlamellen führen. In kommerziellen Entschäumern werden sie für gewöhnlich zusammen mit einem Öl eingesetzt. Die Wirksamkeit der Partikel ist abhängig von der Teilchengröße, der Hydrophobie ihrer Oberfläche und deren Geometrie. Die hydrophoben Festkörper belegen energetisch bevorzugt die Grenzflächen Öl/Wasser.

Die Hauptfunktion dieser Partikel ist es, dem Öltropfen das Eintreten in die Luft/Wasser-Grenzfläche durch Aufbrechen der Pseudo-Emulsionsschicht zu erleichtern (Abb. 6).

Beispiele für gängige Entschämersysteme dieses Typs sind Silikon Compounds, die hydrophobisierte Silikat-Partikel, Silikonöl (PMDS) und/oder alkoxylierte Silikone enthalten. In kohlenwasserstoff-basierten Entschäumern werden als feste Komponenten vor allem Wachse, Fettsäuren, Fettsäureester, Fettalkohole oder Amide eingesetzt. Dabei ist zu beachten, dass der Schmelzpunkt der Partikel oberhalb der Anwendungstemperatur liegt.

Auch die in Waschmitteln nach wie vor häufig eingesetzten Seifen haben eine entschäumende Wirkung. Diese beruht auf der Bildung unlöslicher Kalkseifen während des Waschvorgangs und ist damit abhängig von der Wasserhärte und vom verwendeten Buildersystem.

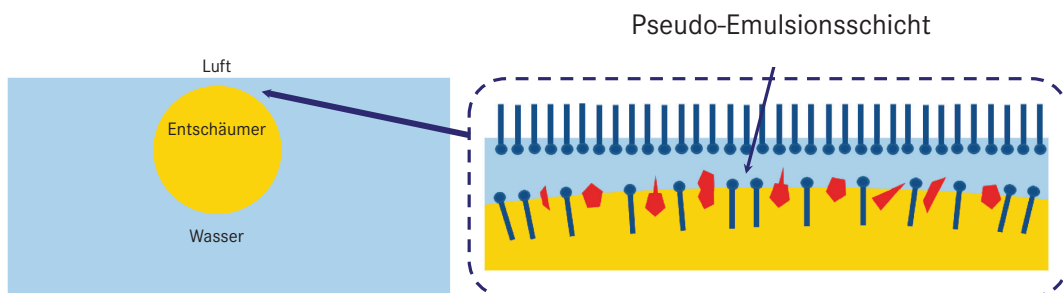


Abb. 6

Partikel mit unregelmäßigen Formen helfen dem Entschäumer-Tropfen, in die Pseudo-Emulsionsschicht einzudringen.

Auf einem ähnlichen Mechanismus der Bildung unlöslicher Salze beruht die Entschäumerwirkung von Phosphorsäureestern.

Tenside

Wie schon in Kap. 3 erwähnt, sind nichtionische Tenside oberhalb ihres Trübungspunktes schaumarm, manche können sogar als Entschäumer eingesetzt werden. Der Wirkmechanismus basiert auf einer Phasentrennung der schäumenden Lösung, wenn die Temperatur den Trübungspunkt überschreitet. Beispiele solcher Entschäumer, die in vielen Fällen zusätzlich noch eine gute Netz Wirkung zeigen, sind EO/PO-Blockpolymere, Alkoholalkoxylate und Ethylendiamin-EO/PO-Blockpolymere.

Ganz allgemein zeigen 2-Komponenten-Flüssigkeiten mit einer Region teilweiser Mischbarkeit zunächst eine Zunahme des Schäumens, wenn sich die Zusammensetzung der Grenze zur Phasentrennung annähert. Beim Überschreiten der Grenze in die Zweiphasen-Region wird das Schäumvermögen jedoch stark verringert. Es bilden sich zwei im Gleichgewicht stehende Flüssigkeiten, von denen diejenige mit der niedrigeren Oberflächenspannung als Entschäumer wirkt [15].

Die wichtigsten Anwendungsgebiete für Entschäumer werden in Kap. 5.3 beschrieben. Ein großer Bedarf besteht in der Pulp & Paper-Industrie. In der Textilherstellung werden Entschäumer unterschiedlichen Typs vor allem beim Färben der Fasern und Textilien eingesetzt. In Haushaltswaschmitteln umfasst die

Entschäumer-Palette u. a. Fettsäuren (Seifen), Phosphorsäureester, Fettsäureester, Fettsäureamide, Mineralöle, Wachse und Silikon Compounds. Typische Einsatzgebiete für Tensid-Entschäumer sind die automatische Geschirreinigung und die Zuckerherstellung.

5. Schaum in der Praxis

5.1 Stark schäumende Systeme

Schaum ist erwünscht und trägt wesentlich zu Produkteigenschaften bei

Stark schäumende Systeme spielen vor allem im Bereich Personal Care eine wichtige Rolle. Dazu gehören z. B. Haarfestigerschäume, Rasierschäume, Seifen, Shampoos, Duschgele oder Badezusätze. Handgeschirrspülmittel, Schaumreiniger und Schaumpflegemittel für Leder, Textilien oder Holz sind weitere Haushaltsprodukte aus dieser Klasse. Unter den Produkten für den industriellen Bereich sind vor allem Schaumfinishmittel für die Textilherstellung, Flotationsmittel oder Feuerlöschmittel von Bedeutung. Aber auch in der Herstellung von Lebensmitteln sind Schäume gefragt. Im Folgenden werden einige ausgewählte Systeme näher beschrieben.

Flüssige Körperreinigungsmittel

Flüssige Körperreinigungsmittel wie beispielsweise Shampoos, Flüssigseifen, Duschgele und Badezusätze sollen über ein hohes Schäumvermögen verfügen, das durch entsprechende Tensidkombinationen gewährleistet wird. Schaum wird gleichgesetzt mit hoher Reinigungskraft und ist ein Wohlfühlfaktor bei der Anwendung. Gleichzeitig wirkt der bei der Anwendung erzeugte Schaum einer mechanischen Reibung entgegen. Insbesondere cremige, feinporige Schäume implizieren den Pflegecharakter eines Produktes. Es ist wegen der großen Oberfläche leichter, ein Shampoo auf dem Haar schnell aufzuschäumen als ein Duschgel auf der Haut. Vereinzelt gibt es auch

Aerosolshampoos oder Aerosolduschgele, die direkt als Schaum aus dem Dispenser aufgetragen werden.

Für Körperreinigungsmittel steht eine große Auswahl geeigneter Tenside zur Verfügung, die es erlauben, ein gewünschtes Eigenschaftsbild des Schaums einzustellen. Neben den geforderten Schaumeigenschaften muss ein Tensid, das im Körperreinigungsmittelbereich eingesetzt werden soll, auch ökologisch und dermatologisch unbedenklich sein.

Aufgrund der hohen Anzahl möglicher Tenside und deren Kombinationen sowie der unüberschaubaren Vielfalt von Körperreinigungsmitteln kann an dieser Stelle keine detaillierte Aussage zu den verwendeten Tensiden gegeben werden. Als Basistensid für flüssige Körperpflegemittel wird oftmals Alkylethersulfat in Form des Natriumsalzes verwendet. Dieses Tensid erfüllt die geforderten Eigenschaften wie ökologische Unbedenklichkeit, hohes Schäumvermögen und ein günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis.

Schaum von Körperreinigungsmitteln lässt sich durch die folgenden Attribute beschreiben:

grobblasig	stabil	öliger
feinblasig	instabil	schmierig
mittelblasig	milchig	gelartig
homogen	cremig	wässrig

Je nach Anwendungsgebiet werden verschiedene Arten von Schaum bevorzugt, die sich durch genormte Methoden nur selten anwendungsnah ermitteln lassen. Dies liegt darin begründet,

dass das Schäumvermögen, aber auch die Schaumstabilität im starken Maße von der Art der Schaumerzeugung – also im Wesentlichen der Mechanik – aber auch von der Art des Schmutzes und der Wasserhärte abhängig sind. Alle genannten Parameter sind im Bereich Körperreinigung stark variabel und durch genormte Methoden zur Bestimmung des Schäumvermögens und der Schaumstabilität nicht nachvollziehbar. So ist z. B. die Mechanik der Handwäsche stark verschieden von der Mechanik zur Erzeugung des Schaums in der Badewanne. Weiterhin sind das Schäumvermögen und die Schaumstabilität von Tensiden stark abhängig von weiteren Bestandteilen in der Formulierung. So können z. B. pflegende Zusätze, wie etwa Rückfetter oder Konditioniermittel, beispielsweise Quats, in einer Körperreinigungsmittelformulierung eine signifikante Verringerung von Schäumvermögen und Schaumstabilität eines Tensids bewirken. Daher wird während der Entwicklung eines Körperreinigungsmittels der Schaum selten von Tensiden oder Tensidmischungen allein geprüft, sondern immer in Mischungen mit weiteren Zusätzen, die im Produkt enthalten sein sollen.

Die oben aufgeführten Schaumeigenschaften lassen sich im Regelfall nur sensorisch oder visuell, also subjektiv, bestimmen. Eine Charakterisierung einzelner Tenside mit Hilfe von Standardprüfmethoden ergibt lediglich Hinweise. Die sensorische und visuelle Bestimmung von Schaum erfolgt möglichst anwendungsnah über verschiedene Inhouse-Testmethoden. Wie der Name bereits impliziert, sind diese Inhouse-Testmethoden von Produkt-

entwickler zu Produktentwickler verschieden und somit nicht genormt. Diese Testmethoden werden meist nur ungerne der Öffentlichkeit preisgegeben, da sich dahinter ein großer Teil firmeninternen Know-hows verbirgt.

Eine Kenngröße, der bei der Entwicklung von Körperreinigungsmitteln große Bedeutung zukommt, ist das so genannte Anschäumvermögen. Hierbei wird der Waschvorgang realitätsnah unter definierten Bedingungen in einem Paneltest simuliert. Zu definieren sind die Menge des Produktes, die Anzahl der Probanden, die Temperatur des Wassers, die Art und Dauer des Waschvorgangs, der Beurteilungszeitpunkt sowie die zu bestimmenden Parameter (Menge des erzeugten Schaums, Bestimmung der o. g. Schaumattribute usw.). Um ein möglichst aussagekräftiges Urteil zu erlangen, sollten die Probanden intensiv geschult sein und sollte in jedem Testlauf eine Standardformulierung berücksichtigt werden.

Auch für Badezusätze kann der oben beschriebene Test zur Ermittlung des Anschäumvermögens herangezogen werden, wenn man berücksichtigt, dass die Mechanik in der Anwendung verschieden ist. Idealerweise wird hier der Test zur Bestimmung des Schaums und seiner Eigenschaften realitätsnah unter definierten Bedingungen in einer Badewanne durchgeführt.

Haarfestigerschaum

Haarfestigerschaum oder auch Stylingmousse gibt es als Pump- oder Aerosol-Formulierungen, bei denen nach dem Austragen aus dem Behälter ein stabiler, cremiger, feinporiger Schaum gewünscht wird. Diese Form der Haarfestigung

und Haarkonditionierung wird, anders als Haar-gele oder Haarsprays, meist nach der Reinigung im noch nassen Haar verteilt. Beim Verteilen auf dem Haar soll der Schaum schnell brechen. Anschließend wird beim Trocknen mit dem Föhn frisiert. Die Elastizität des Schaums impliziert ganz unterschiedliche Attribute: sanfter Pflegecharakter oder High-tech-Image.

Hauptbestandteile eines Haarfestigerschaumes sind neben dem (kationischen) Festigerpolymer das Schaum bildende Tensid. Häufig werden kationische Tenside verwendet, weil deren Verträglichkeit mit dem kationischen Harz gegeben ist. Weitere Zusatzstoffe können sein: Emulgatoren, Verdicker, Lösemittel wie Alkohol, Wirkstoffe wie Feuchthaltemittel, UV-Absorber usw.

Rasierschaum

Primäres Ziel der Nassrasurmittel ist es, die Haare aufzuweichen. Dies wird durch den leicht basischen pH-Wert der Seifen und die Wasseraufnahme nach Entfernung der Sebumschicht (Fettschicht) auf Haut und Haar erreicht. Das Aufweichen der Haare bewirkt eine deutliche Reduzierung der erforderlichen Schnittkräfte, so dass die Rasur nicht mehr als unangenehm empfunden wird. Außerdem bewirken die Nassrasurmittel einen Gleiteffekt auf der Gesichtshaut, wodurch die Hautreizung minimiert wird.

Die Nassrasurmittel existieren als feste Rasierseifen, pastöse schäumende bzw. nicht schäumende Rasiercremes, nicht schäumende bzw. schäumende Rasiergele und als Aerosol-Rasierschäume und Aerosol-Rasiergele. Die folgenden Beschreibungen beschränken sich auf schäumende Produkte.

Hauptbestandteil einer Rasierseife sind die aus Stearinsäure gebildeten Natrium- und Kaliumstearate (ca. 65%). Aufgrund der schnelleren Löslichkeit der weicheren Kaliumseifen sind diese hauptsächlich für das schäumende Verhalten der Seife verantwortlich. Neben pflanzlichem Kokos- oder Palmkernöl werden üblicherweise auch Feuchthaltemittel (Glycerin, Propylenglykol), Lanolin als Überfettungs- und Gleitmittel sowie Parfümöle zugesetzt. Außerdem ist ein Restgehalt von 1-2% an Stearinsäure erforderlich, um die Hautfreundlichkeit fester Rasierseifen gewährleisten zu können.

Aerosol-Rasierschäume gehören heute zu den beliebtesten Nassrasurmitteln. Es handelt sich um eine modifizierte schäumende Rasiercreme mit Treibgasen (Propan, Butan, Isobutan) zur selbstständigen Schaumbildung. Diese Mischung aus Seife und Treibgas ist in der Dose prinzipiell instabil und muss daher vor Gebrauch immer gut geschüttelt werden. Der Zusatz von Alkoholethoxylaten dient der Stabilisierung des Aerosolschaums bei der Anwendung. Der Behälter besteht aus einem Zweikammersystem, wobei die eine Kammer das Gel - eine homogene Mischung aus Seife und dem „inneren“ Treibgas - und die andere Kammer das „äußere“ Treibgas enthält. Dieses drückt bei Betätigung des Ventils das Gel aus der Dose.

Auch bei nachschäumenden Aerosol-Rasiergele handelt es sich um eine modifizierte Seife, die aber, im Gegensatz zum Aerosol-Rasierschaum, mit dem Treibgas eine homogene, transparente Mischung bildet. Beim Betätigen des Ventils erhält man ein gelartiges

Produkt, das erst beim Verteilen auf der Haut aufschäumt. Der Vorteil ist, dass dieser Produkttyp vor Gebrauch nicht geschüttelt werden muss. Charakteristisch für Rasiergele ist außerdem ihr Gehalt an hochmolekularen, wasserlöslichen Polymeren als Verdickungsmittel.

Handgeschirrspülmittel

Beim manuellen Geschirrspülen wird der Reinigungseffekt durch die Kombination von Tensiden mit mechanischer und thermischer Energie erbracht. Das Spülgut wird unter Einwirkung einer wässrigen, im Allgemeinen 30-40 °C warmen Tensidlösung (Spülflotte) mit einem Schwamm, einem Lappen oder einer Spülbürste per Hand gereinigt. Danach wird das Geschirr mit Wasser nochmals gespült und zum Ablaufen der Spülflotte und Trocknen aufgestellt.

Die Anforderungen an ein Spülmittel sind komplex und umfassen neben einer hohen Spülleistung und rückstandsfreiem Trocknen nach dem Spülen auch folgende Attribute: ein gutes und hohes Fettaufnahme- und Schmutztragevermögen, gutes Schäumvermögen, rückstandsfreies Ablaufverhalten und Trocknen des Spülguts, Hautverträglichkeit auch bei empfindlichen Personen, hohe Ergiebigkeit und gutes Preis-Leistungs-Verhältnis, toxikologische Unbedenklichkeit und eine gute biologische Abbaubarkeit aller organischen Inhaltsstoffe.

Obwohl der Schaum keinen Beitrag zur eigentlichen Reinigungsleistung liefert, ist er ein wichtiger Indikator für das Schmutzaufnahmevermögen der Spülflotte. Reißt die Schaumdecke auf der Spülflotte dauerhaft, so ist in der Regel deren Reinigungskraft erschöpft.

Typische Zusammensetzungen von konventionellen Handgeschirrspülmitteln und Konzentraten sind in der Tabelle auf der nächsten Seite angegeben.

Schaumreiniger für harte Oberflächen

Schaumreiniger für harte Oberflächen sind stark schäumende, hochalkalische, flüssige Reinigungsmittel, die z. B. in Molkereien und Schlachthöfen, aber auch im Haushalt, z. B. als Backofenreiniger, eingesetzt werden. Beim Einsatz in Molkereien und Schlachthöfen wird das Reinigungsmittel unter Verwendung einer Schaumlanze unverdünnt angesaugt. Die Schaumstabilität und das Schaumvolumen werden durch die Luftzufuhr an der Lanze geregelt. Bei einer Verdünnung der Formulierung bis zu 1:100 mit Wasser kann sie mit einem geeigneten Sprühgerät auf die Verschmutzungen aufgesprüht werden. Nach einer gewissen Einwirkzeit werden dann die Flächen mit Wasser abgespült.

Der Einsatz einer Schaumlanze in Verbindung mit einem Hochdruckreinigungsgerät gewährleistet die Bildung eines voluminösen, gut haftenden Schaums, der zur Entfernung von hartnäckigen Verschmutzungen wie angetrockneten Blutresten, Fetten, Protein- und Kohlenhydratrückständen von gefliesten Wänden und Bodenflächen oder Edelstahloberflächen in Schlachthöfen, Wurstfabriken, Metzgereien, Molkereien oder sonstigen lebensmittelverarbeitenden Betrieben geeignet ist.

Ein typischer Schaumreiniger kann aus folgenden Bestandteilen aufgebaut sein: Wasser, Ätzalkalien (Natron- oder Kalilauge), Natrium- oder Kali-Wasserglas, Natrium- oder Kalium-

Typische Zusammensetzung konventioneller Handgeschirrspülmittel und Konzentrate

Inhaltsstoffe	Konventionell	Konzentrat	Funktion
Tenside und Cotenside ■ Alkylbenzolsulfonate ■ Fettalkoholethersulfate ■ Fettalkoholsulfate ■ Fettalkoholpolyglykoether ■ Alkylpolyglucoside ■ N-Methylglucamid ■ Alkylaminoxid ■ Cocoamidopropylbetaine	10-25 %	25-40 %	Benetzung von Spülgut und Schmutz, Ablösen von Fett und anderen Verschmutzungen, Schaumerzeugung und -stabilisierung
Rückfetter ■ Fettsäureamide	0-2 %	0-3 %	Rückfettung der Haut
Pflegekomponenten ■ Proteinhydrolysate ■ Aloe Vera	0-5 %	0-5 %	Pflege der Haut
Zitronensäure			pH-Wert-Einstellung
Lösevermittler ■ Alkohole ■ Cumolsulfonat ■ Harnstoff	0-7 %	0-10 %	Solubilisierung
Duftstoffe	0-1 %	0-1 %	Ästhetik
Farbstoffe	0-0,1 %	0-0,1 %	
Konservierungsmittel	0-0,1 %		Haltbarkeit
Antibakterielle Wirkstoffe ■ Natriumbenzoat	0-2 %	0-3 %	Keimminderung

pyro- oder -tripolyphosphate, Polymere (z. B. Natrium-Polyacrylate), nichtionische Tenside (z. B. C10-Alkoholethoxylat ca. 7-8 Mol EO oder Alkylpolyglucoside), Schaumstabilisatoren (z. B. Phosphatester) sowie - falls erforderlich - Solubilisierungsmittel (z. B. Cumolsulfonat).

Auch im Innenraum von Backöfen eingebrannte Speisereste bilden hartnäckige, schwer zu beseitigende Verkrustungen, die häufig nur mühsam manuell entfernt werden können. Der Markt bietet hierfür stark alkalische Spezialreiniger, die in Form von Schaumsprays oder

Gelen angeboten werden und verkrustete Fett- und Zuckerrückstände in und auf Backöfen, Kuchenblechen, Herdplatten und Grillgeräten, Töpfen und Pfannen aus Edelstahl und feuerfestem Glas oder Keramik entfernen. Die betroffenen Flächen werden eingesprüht und nach empfohlener Zeitspanne mit einem nassem Schwamm oder Tuch abgewischt.

Diese Spezialreiniger enthalten im Allgemeinen anionische und nichtionische Tenside, z. B. Alkylpolyglucoside zur Benetzung der Oberfläche und bei Sprays zur Schaumbildung, Alkalien wie Kalilauge und Monoethanolamin oder Triethanolamin zum Anquellen von eingebrannten Speiseresten und zur Unterstützung der Reinigungsleistung, Lösemittel wie Glykol zur Verstärkung der schmutzablösenden Wirkung, Verdicker zur verbesserten Haftung der Produkte an senkrechten Flächen oder an Decken, Treibgas, z. B. Butan, zum Generieren des Reinigungsschaums, sowie Komplexbildner und Parfümöl.

In praxisnahen Anwendungstests werden bevorzugt Ablaufgeschwindigkeit und Stabilität des Schaums gemessen. Schaumstabilität und Schaumdichte sind wichtige Parameter für die Reinigungsleistung.

Beschichtung textiler Flächen Teppiche und dickere technische Textilien

Für textile Flächengebilde wie Teppichböden und technische Textilien gelten besondere Anforderungen. Beide Gebilde haben oft eines gemeinsam: Um ihre Funktion erfüllen zu können, werden sie mit Polymerdispersionen beschichtet. Während es Textilausrüstungen

gibt, bei denen ein Schäumen unerwünscht ist (s. Kap. 5.3), wird bei der Beschichtung, beispielsweise von Teppichen, oft „mit Luft verdünnt“, d. h. geschäumt aufgetragen.

Die überwiegend wässrigen Polymerdispersionen mit einem Feststoffgehalt von ca. 50 % und einer Dichte von ca. 1000 g/l werden mit einem Industrieschaummixer auf Dichten (Schaumlitergewichte) um 500 g/l, aber auch bis zu <100 g/l aufgeschäumt. Dabei wird die Luft über ein Rotor-Stator-System im so genannten Mixkopf automatisch und kontinuierlich mit der Polymerdispersion vermischt. Da die Polymerdispersionen oft auch feste Füllstoffe wie Kreide oder Flammschutzmittel enthalten, werden zum Erreichen der gewünschten Schaumlitergewichte Schaumhilfsmittel zugegeben. Der Dispersions- oder Compoundschaum wird entweder durch Walzen aufgetragen (Pflatschwerk) oder er wird direkt auf das textile Flächengebilde aufgetragen und durch eine Rakel begrenzt. Nach dem Auftrag erfolgt entweder die Einarbeitung der Beschichtung durch ein Walzenquetschsystem, oder es erfolgt die Verklebung (Kaschierung) mit einem Zweitrückengewebe.

Die gewünschten Schaumeigenschaften variieren. Wir unterscheiden zwischen

- instabilem oder kollabierendem Schaum (zerfällt direkt nach dem Auftrag),
- metastabilem Schaum (zerfällt während der Trocknung) und
- stabilem Schaum (auch nach der Trocknung noch als Schaum erkennbar).

Zur Einstellung der Schaumeigenschaften werden meist anionische, aber auch amphotere Tenside verwendet.

Zur Prüfung der Schaumeigenschaften werden Polymerdispersion oder Compound mit einem Küchenhandmixer oder einer Planetenrührmaschine aufgeschäumt, dann die Schaumdichte (Schaumlitergewicht) bestimmt sowie die Schaumstabilität beurteilt. Die Einstufung der Schaumeigenschaften erfolgt nach festgelegten Kriterien.

Vliesstoffe

Wässrige Bindemittel (Dispersionen) werden mit Foulard bzw. Size Press und Sprühanwendung sowie als Schaum auf textile Flächegebilde oder Vliesstoffe appliziert. Dabei werden Vinylacetat/Ethylen, Acrylat-, PVC-, Polyurethan- und Styrol-Butadien-Dispersionen verwendet.

Vorteile der Schaumanwendung liegen im niedrigeren Energiebedarf beim Trocknen (Luft statt Wasser), dem weicheren Griff und der Möglichkeit von zweiseitigen Beschichtungen. Der Schaum wird dabei durch mechanisches Einrühren von Luft und durch den Zusatz von oberflächenaktiven Substanzen (Tenside) erzeugt.

Bei instabilen Schäumen wird bei niedrigen Schaumdichten bis 30 g/l gearbeitet. Der Auftrag instabiler Schäume zeichnet sich durch eine ausgesprochene Homogenität aus. Für Stabilschäume mit Schaumdichten >100 g/l werden zusätzliche Schaumstabilisatoren wie z. B. Ammoniumstearat verwendet. Je nach Anwendung werden in der Rezeptur noch Verdickungsmittel, Füllstoffe und externe Vernetzer zugesetzt. Als wesentliche weitere

Einflussgröße ist die Viskosität des Schaumes anzusehen. Typische Beispiele sind Stabilschäume mit hoher Viskosität, die eine Beschichtung des Substrates ohne signifikantes Eindringen ermöglichen, während auf der anderen Seite durch wasserdünne Produkte eine homogene Imprägnierung erreicht werden kann.

Beispiele für Anwendungen von instabilen Schäumen liegen in der Veredelung von Substraten durch Polymerbeschichtung (Griffgebung, Hydrophobierung, mechanische Stabilität) und der Verfestigung von Vliesstoffen. Metastabile Schäume werden z. B. für die Schnittfestausrüstung und flammhemmende Rückenbeschichtung verwendet. Beispiele für Stabilschaumanwendungen liegen in Black-out-Beschichtungen von Rollos, Tischdecken und Beschichtungen für wind- und wasserdichte Textilien vor.

Flotation

Als Flotation bezeichnet man die Trennung von suspendierten Feststoffen aus einer Flüssigkeit mit Hilfe der Auftriebskraft feinstverteilter Gasbläschen. In der Praxis handelt es sich dabei meistens um wässrige Suspensionen, in die Luft eingetragen wird. Bei diesem Trennprozess nutzt man die unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften der zu trennenden Feststoffe, d. h. vorrangig deren Hydrophobie.

Bei einer Schaumflotation lagert sich das in der Suspension verteilte eingeblasene Gas bevorzugt an die hydrophobe Feststoffkomponente an und trägt diese an die Oberfläche, während die hydrophilen Komponenten in der Suspension verbleiben. Der mit der Wertkomponente

angereicherte aufschwimmende Schaum wird abgetrennt und weiterverarbeitet.

Schäume in der Flotation müssen eine gute Tragfähigkeit für den Feststoff haben. Dieser stabilisiert den Schaum oft dadurch, dass er sich in den Plateaukanälen ansammelt. Allerdings darf die Stabilität des Schaums nicht zu hoch sein, da er nach der Abtrennung wieder zerfallen soll.

Da die Unterschiede der zu trennenden Feststoffe bezüglich ihrer Hydrophilie und Hydrophobie in den in der Natur vorliegenden Systemen nicht ausreichend ausgeprägt sind, wird die Hydrophobierung des abzutrennenden Stoffs durch Zusatz von Flotationshilfsmitteln, die auch als Sammler bezeichnet werden, unterstützt. Die Effektivität eines Flotationsprozesses hängt ganz wesentlich von der Auswahl des geeigneten Flotationshilfsmittels ab. Dabei handelt es sich meistens um organische Verbindungen oder deren Salze. In der Erz- und Kalisalzauflbereitung werden vorrangig langkettige Alkylamine, aber auch Cellulosederivate, Stärke, Öle und Petroleum verwendet.

Eine zweite Gruppe von Flotationshilfsmitteln sind die Schäumer. Als Schäumer und Schaumstabilisatoren werden oft nichtionische Tenside mit kurzer Alkylkette eingesetzt, wie z. B. C1-C10-Alkoholetoxylate oder Methyl-isobutylcarbinol. In der Praxis gibt es bei vielen Flotationshilfsmitteln eine Überlappung zwischen Sammler- und Schäumereigenschaften.

Erstmals wurde die Flotationstechnologie in der Metallerzaufbereitung zur Trennung von Blei und Zink genutzt, später z. B. auch zur

Trennung von Kalium- und Natriumsalzen.

Weitere Einsatzgebiete finden sich in der Kohleindustrie, im Weinbau zur Vorklärung von Most, bei der Trennung industrieller Schlämme aus Fällungsprozessen sowie in der Papieraufbereitung beim Deinking-Prozess (s. Kap. 5.3). Das Deinking ist ein Flotationsprozess, in dem Schaum bewusst erzeugt wird.

Tenside beeinflussen sowohl die Struktur der Gasblasen als auch die des Schaums. Als anwendungsnahe Prüfmethode, die beide Aspekte beinhalten, werden in der Verfahrensausarbeitung vor allem Versuche in Flotationszellen durchgeführt, in denen die spezifischen Fragestellungen praxisnah simuliert werden können.

Löschschaum

Zur Herstellung des Feuerlöschschaums wird Löschwasser mit 0,1-6,0 % eines Schaumkonzentrats versetzt. Die erforderliche Menge Schaumkonzentrat hängt von dem Typ des Schaumkonzentrats, dem Brennmaterial und dem Feuerlöschgerät ab. Mit Luft wird diese Mischung im Schaumerzeuger expandiert. Über das Luftverhältnis kann die Qualität des Feuerlöschschaums eingestellt werden. Eine geringe Luftmenge führt zu einem schweren „nassen“, ein hoher Luftanteil zu einem leichten „trockenen“ Schaum. In jedem Fall ist das Schaumvolumen um ein Vielfaches größer als die Wasser/Schaumkonzentrat-Lösung.

Ein Feuerlöschschaum hat bei der Brandbekämpfung zwei wesentliche Funktionen. Zum einen soll über einen Kühleffekt auf das Brennmaterial eine Absenkung der Temperatur zur

Vermeidung von Zündungen bzw. Nachzündungen erzielt werden. Außerdem geht es darum, durch die Ausbreitung eines Schaumfilms die Zufuhr von Luftsauerstoff zum brennbaren Material zu verhindern.

Schaumfilme basierend auf Fluortensiden sind typische Vertreter für die Brandbekämpfung von unpolaren Flüssigkeiten (Benzine und Öle). Alternativ wird auch zunehmend Löschschaum basierend auf natürlichen Proteinen (hydrolisiertes Keratin) und Fluorproteinen eingesetzt, die gute Brandbekämpfungsleistungen mit minimalen Auswirkungen auf die Umwelt kombinieren.

Problematischer ist die Brandbekämpfung polarer Flüssigkeiten (organischen Säuren, Alkoholen, Aldehyden und Ketonen). Der sich bildende Schaum wird durch die Mischbarkeit der polaren Flüssigkeiten mit dem Schaum sofort zerstört und kann so keine Schutzschicht zum Luftsauerstoff aufbauen. Für diese Art von Bränden werden daher besondere Schaummittel eingesetzt, die durch Lufteinschlüsse und Gelbildner (Polysaccharide) eine auf der polaren Flüssigkeit schwimmfähige, schwammige Schutzschicht bilden, die dann den nachfolgenden Schaum vor der Zerstörung schützt.

Neben dem oberflächen- und grenzflächenaktiven Tensid enthalten die fertigen Schaumkonzentrate zur Verbesserung der Löscheinrichtungen weitere Komponenten wie Frostschutzmittel, Schaumstabilisatoren oder Gelbildner. Zur Prüfung von Feuerlöschschäumen dienen verschiedene, den speziellen Anforderungen angepasste und normierte Methoden.

Lebensmittel

In der Lebensmittel- und Getränkeindustrie spielen Schäume eine ganz unterschiedliche Rolle. Manchmal ist starkes Schäumen erwünscht, in anderen Fällen muss es möglichst verhindert werden. An dieser Stelle soll anhand des Beispiels von Flüssigschäumen nur auf den ersten Fall eingegangen werden.

Lebensmittelschäume bestehen im Allgemeinen aus einem flüssigen oder festen Dispersionsmittel, in dem Gase, meistens Luft, feinverteilt sind. Man kennt niedrig-viskose Schäume, wie beispielsweise auf dem Bier, aber auch hochviskose oder halbfeste Schäume – wie Teige oder Parfaits. Bezogen auf die Vielzahl von Anwendungsbeispielen in der Lebensmittelindustrie unterscheidet man hauptsächlich zwischen protein- und fettstabilisierten Schäumen.

Proteinstabilisierte Schäume, wie in Schaumzuckerwaren, Desserts und Sahnen, werden meistens mit Hühnereweiß hergestellt. Sie sind besonders stabil, da die im Eiklar vorhandenen Proteine an der Grenzfläche zwischen Gas und Flüssigkeit irreversibel denaturieren. Bei Proteinschäumen, z. B. aus Milch- und Molkenproteinen oder Eigelb und Eiklar von Enteneiern, ist das nicht der Fall.

Bei fettstabilisierten Lebensmittelschäumen, wie Eiscremes, Schlagsahne oder Desserts, tragen Fettkristalle zur Fixierung der Gasbläschen bei, indem sie die Bläschen netzwerkähnlich umhüllen und einschließen. Die Zusammenhänge zwischen den physikalischen Eigenschaften der Rohstoffe, dem Mechanismus des

Schaumaufbaus, der Optimierung der Gasdispersion und der Schaumstabilität sind bei fettstabilisierten Schäumen besonders komplex.

Zur Stabilisierung von Fettschäumen werden häufig Mischemulgatoren eingesetzt, die sowohl O/W- als auch W/O-Eigenschaften besitzen. Eine O/W-Emulgierung wirkt sich positiv auf die Luftaufnahme beim Verschäumen aus; eine W/O-Emulgierung dient der Stabilisierung der Fettkristall-/Wasserphase. In Frage kommen dafür beispielsweise Sorbitanesterderivate, Diacetylweinsäureester, Glycerinester, modifizierte Triglyceride und Saccharoseester.

Geschäumte Produkte, insbesondere Süßwaren und Milchprodukte, erfreuen sich großer Beliebtheit. Bei der Herstellung der Schäume ist neben einer guten Schaumstabilität wichtig, dass der Konsument einen direkten Zusammenhang zwischen den physikalischen und den gewünschten sensorischen Eigenschaften des produzierten Schaums herstellen kann. Eine lockere und leichte Schaumtextur, die ein cremiges Mundgefühl ergibt und dadurch beim Verbraucher eine besonders hohe Akzeptanz findet, wird üblicherweise durch möglichst kleine und eng verteilte Bläschen erzeugt. Neben der sensorischen Prüfung kann die gewünschte Produktkonsistenz auch mit Hilfe rheologischer Untersuchungen (Fließkurven) sichergestellt werden [16].

5.2 Schwach schäumende Systeme

Starke Schaumbildung ist unerwünscht, das Schaumvolumen wird reguliert und niedrig gehalten

Schwach schäumende Systeme findet man vor allem im Anwendungsbereich der Wasch- und Reinigungsmittel. Hier wird in der Regel ein gewisses Maß an Schaum toleriert, da er eine typische Eigenschaft der Tenside ist, die für die geforderte Reinigungsleistung unverzichtbar sind. Oft verbindet der Verbraucher deshalb sogar das Auftreten von Schaum mit Wasch- und Reinigungsleistung. In einigen Fällen kann die Performance der Produkte durch gezielte Beeinflussung der Schaumeigenschaften auch verbessert werden. Wegen der zum Teil sehr unterschiedlichen Prozesse und Anwendungsbedingungen soll der Bereich „Industrielle Reinigung (I&I)“ getrennt betrachtet werden.

Waschmittel

Waschmittel sind Formulierungen, die, in Wasser gelöst, zur Reinigung und zum Waschen von Textilien verwendet werden. Zu den Anforderungen, die an sie gestellt werden, gehören Sauberkeit, Schonung und Pflege der gewaschenen Textilien, Hautverträglichkeit, Umweltfreundlichkeit und ein möglichst niedriger Preis. Je nach Anwendung unterscheidet man nach Voll-, Color-, Fein- und Spezialwaschmittel, die in unterschiedlicher Form als Pulver, Flüssigkeit oder Gel angeboten werden. Moderne Waschmittel bestehen aus 10-20 verschiedenen Kom-

ponenten wie Tensiden, Gerüststoffen (Builder), Bleichmitteln, Enzymen und anderen.

Tenside bilden als waschaktive Komponente die Grundlage jeder Waschmittelrezeptur. Sie setzen die Oberflächenspannung des Wassers herab, wodurch die Fasern besser benetzt und insbesondere öl- und fetthaltiger Schmutz besser abgelöst wird. In Waschmitteln werden überwiegend anionische und nichtionische Tenside eingesetzt. Letztere haben den Vorteil einer geringeren Empfindlichkeit gegen Wasserhärte. Kationische Tenside können in Kombination mit anionischen und nichtionischen Tensiden die Leistung verbessern. Die Wirkung des Tensidsystems hängt wesentlich von seiner Zusammensetzung und der Wechselwirkung mit den anderen Inhaltsstoffen ab. Neben den bereits genannten Eigenschaften besitzen Tenside zum Teil ein sehr ausgeprägtes Schäumvermögen.

Volumen und Stabilität des Schaums hängen von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. Dadurch ist zu erklären, dass das Schaumverhalten von Tensiden oder von Tensidmischungen sehr unterschiedlich sein kann. Anionische Tenside, und hier besonders die Fettalkohol-ethersulfate (FAES), schäumen meist stark, nichtionische Tenside sind im Allgemeinen schaumärmer. Schaumbildung und -intensität sind jedoch kein Indiz für die Waschwirkung eines Tensids. Das Schaumverhalten von Waschmitteln wird vielmehr je nach Verwendungszweck durch Auswahl der Tenside und entsprechender Hilfsstoffe gezielt eingestellt.

- In Vollwaschmitteln sind im Temperaturbereich von 30-95 °C schaumarme Tensidsysteme erwünscht. Dies lässt sich durch Zusatz von Schauminhibitoren, wie z. B. Silikon- oder Paraffinölen, erreichen.
- Bei Wollwaschmitteln ist dagegen, ähnlich wie bei Schaumreinigern, Shampoos und anderen Reinigungsmitteln, ein stabiler, kleinblasiger Schaum erwünscht, um die Faser durch Verringerung der mechanischen Krafteinwirkung zu schonen. Dies kann durch so genannte Schaumbooster wie z. B. Fettsäureethanolamide erreicht werden, die die Lamellenelastizität erhöhen.

Auch heute noch wird vielfach das Vorhandensein von Schaum fälschlicherweise als Voraussetzung für einen guten Wascherfolg angesehen; dies ist z. B. bei Handwaschmitteln der Fall. Tatsächlich ist aber ganz im Gegenteil ein Zuviel an Schaum meist problematisch, da große Schaummengen die mechanische Bewegung in der Waschmaschine dämpfen und dadurch die Waschwirkung herabsetzen. Zum wirklichen Ärgernis wird zuviel Schaum in der Waschmaschine spätestens dann, wenn der Schaum aus der Maschine quillt.

Da viele Tenside von Natur aus ein ausgeprägtes Schäumvermögen zeigen, müssen den Waschmitteln Schauminhibitoren oder Schaumregulatoren zugesetzt werden. Der bekannteste Schauminhibitor ist die Seife – genauer gesagt, sind es die in Wasser gebildeten unlöslichen Kalkseifen. Um diesen Effekt erzielen zu können, müssen allerdings genügend Calciumionen im Wasser vorhanden sein, was in Gebie-

ten mit weichem Wasser nicht immer der Fall ist. Weitaus wirkungsvoller gegenüber der Schaumbildung anionischer und nichtionischer Tenside sind spezielle Silikon- und Paraffinöle, deren Wirkung unabhängig von der Wasserhärte ist (s. Kap. 4).

Die üblichen Prüfmethode für das Schaumverhalten der in Waschmitteln eingesetzten Tenside sind vor allem das Lochscheiben-Schlagverfahren, der Turbinenrührer- und der Zirkulationstest sowie zahlreiche Inhouse-Methoden. Zur Untersuchung der fertigen Waschmittelformulierungen werden insbesondere Inhouse-Methoden unter Verwendung von Waschmaschinen eingesetzt.

Automatische Geschirreinigung

Der Gesamtspülprozess in einer Haushaltsgeschirrspülmaschine besteht aus mehreren Spülgängen mit unterschiedlichen Funktionen. Als Spülmittel wird in der Regel ein System aus drei Komponenten verwendet, das aus Reiniger, Klarspüler und Regeneriersalz für den Wasserenthärter in der Maschine besteht. Nach jedem Spülgang wird die Spülflotte abgepumpt. Es bleiben dabei jedoch Reste aus dem vorausgegangenen Spülgang mit einem Volumenanteil von ca. 10-15% zurück, die dann durch das zulaufende Frischwasser verdünnt werden. Durch dieses Prinzip verbleibt zwangsläufig immer ein geringer Teil der Reinigungsflotte bis zum Klarspülgang in der Maschine (Laugenverschleppung).

Im Vorspülgang wird mit kaltem Wasser der nicht fest anhaftende Schmutz entfernt. Der anschließende Reinigungsgang bewirkt eine

gründliche Reinigung des Spülguts mit heißer Reinigungsflotte. Mit dem nachgeschalteten Zwischenspülgang werden die verbliebenen Schmutzpartikel, die sich auf Geschirr und Maschinenteilen abgesetzt haben, entfernt. Der heiße Klarspülgang und die Trocknung dienen dazu, dass das Spülgut am Ende des Spülprozesses trocken ist und optisch ansprechend aussieht. Um diese Anforderung zu erfüllen, ist auch bei optimaler Maschinenfunktion der Einsatz eines Klarspülers notwendig.

Der Klarspüler hat dabei in erster Linie die Aufgabe, die Oberflächenspannung des Wassers herabzusetzen. Hierdurch wird das Spülgut vollständig benetzt und ein filmartiger Ablauf der Klarspülflotte erreicht. Dieses Ablaufverhalten ist die Voraussetzung für das vom Verbraucher erwartete Aussehen von sauberem Geschirr. Das Spülgut soll bei der Entnahme aus der Maschine trocken sein und eine flecken- sowie streifenfreie, gleichmäßig glänzende Oberfläche aufweisen. Wichtig für den Reinigungserfolg ist die Regulierung der Schaumbildung in der Geschirrspülmaschine. Bei zu starker Schaumbildung wird die mechanische Wirkung des Spritzstrahls herabgesetzt: Dies kann so weit gehen, dass der rotierende Sprüharm nur noch ungenügend rotiert.

Die Hauptursachen für Schaumentstehung in der Spülmaschine sind proteinhaltige Anschmutzungen, verbunden mit der Mechanik der Spülmaschine, die die Schaumbildung extrem fördert. Daher werden in allen Rezepturen für Haushaltsgeschirreiniger nur spezielle schaumarme Tenside eingesetzt, die als Netz-

mittel nicht zusätzlichen Schaum erzeugen, sondern im Gegenteil die Schaumbildung regulieren. Um eine zusätzliche Pufferwirkung zu erzielen, werden Entschäumer verwendet. In industriellen Anwendungen kann es notwendig sein, speziell abgestimmte Kombinationen von Netzmitteln und Entschäumern einzusetzen, um hartnäckigen Schaum zu bekämpfen.

Zur Schaumprüfung werden neben den normierten Schaumtests auch anwendungsnahe Verfahren verwendet, wie z. B. messtechnisch speziell ausgerüstete Geschirrspülmaschinen mit praxisnaher Auswahl an Geschirr- und Schmutzbelastung.

Industrielle Flaschenwäsche

Gebrauchte Flaschen für Getränke, wie Bier, Säfte, Mineralwasser oder Milch, müssen intensiv gereinigt werden, bevor sie für eine Wiederverwendung geeignet sind. In erster Linie betrifft dies Glasflaschen. Der Anteil an wiederverwendbaren Kunststoff-Flaschen (PET) hat in den letzten Jahren aber stark zugenommen. Daraus leiten sich besondere Anforderungen an die Reinigungsmittel und Technologie ab, da sich eine Kunststoffoberfläche hinsichtlich Widerstandsfähigkeit und Struktur deutlich von Glas unterscheidet.

Eine Flaschenwäsche ist sowohl aus ästhetischen als auch hygienischen Gründen erforderlich und muss beiden Anforderungen Rechnung tragen. Bei der Reinigung des Flascheninneren geht es primär um die Beseitigung von Getränkeresten und Verunreinigungen, wie z. B. Schimmel, die sich während der Lagerung nach der Öffnung und Leerung gebildet haben. Zur

äußeren Reinigung gehört die Entfernung von Etiketten und sonstigem Schmutz.

Weltweit wird die Flaschenreinigung überwiegend im industriellen Stil durchgeführt. Dabei werden spezielle Flaschenreinigungsanlagen eingesetzt, die in der Regel mit hochalkalischen Reinigern betrieben werden. Das Alkali wird in einem Additivpaket separat zugegeben, z. B. als 50%-ige Natronlauge. Im Reinigungsprozess liegt die Konzentration bei 1-2% und trägt wesentlich zur Verbesserung der Benetzung und der gesamten Reinigungsleistung bei. Neben Alkali enthalten die Formulierungen ein spezielles schaumarmes Tensidsystem, das auf die Arbeitstemperatur der Anlage abgestimmt ist. Bei den dabei verwendeten schaumarmen nichtionischen Tensiden, die in Konzentrationen von 10-20% eingesetzt werden, handelt es sich insbesondere auch um endgruppenverschlossene Alkoholalkoxylate. Weitere Formulierungsbestandteile sind Phosphorsäure (ca. 30%) als Builder und Hydrotrop, Glukonsäure (5-10%) oder Phosphat und Komplexbildner (1-5%) als Enthärter und Polycarboxylate (1-5%) als Dispergiermittel.

Je nach den betrieblichen Voraussetzungen kann bei der Flaschenwäsche Schaum entstehen, der den Reinigungsprozess empfindlich stört. In besonders kritischen Fällen kann das Laugenbad überschäumen und Etikettenreste können Düsen, Pumpen und Wärmetauscher in ihrer Funktion beeinträchtigen. Die Schaumneigung der alkalischen Reinigungsbäder nimmt in der Regel mit zunehmendem Durchsatz und Alter zu. Je nach Art der zu reinigenden

Flaschen, Maschinentyp und Flaschendurchsatz kann der Schaumaufbau sehr unterschiedlich sein.

Die Schaumbildung ist auf eingeschleppte oder in der Lauge gebildete Substanzen zurückzuführen. Dies sind z. B. Farbpigmente und Leim von Etikettenpapieren oder Kettengleitmittel. Auch Getränkereste sind Quellen für Schaum stabilisierende und Schaum bildende Substanzen. So neigen beispielsweise Reste von Bier, Öl, Limonaden, Fruchtsäften oder Milch zum Schäumen, weil sie als Schäumer wirksame Bestandteile wie Zucker, Stärke, Eiweiß, Pektine und deren Abbauprodukte sowie verseifbare Öle und Fette enthalten.

Die Schaumbildung wird durch die mechanische Beeinflussung der Reinigungslauge hervorgerufen, also durch Pumpen, Überswallen und Verspritzen. Von besonderem Einfluss auf das Schäumverhalten ist auch die Alkalikonzentration des Reinigerbades. Bei der Schaumregulierung muss das unterschiedliche Zusammenwirken von Schaumbildnern und Schaumstabilisatoren berücksichtigt werden. Die meisten der aus anderen technischen Bereichen bekannten Schaumzerstörungsmittel werden bei der Flaschenreinigung nicht eingesetzt, weil sie entweder in den Reinigungslaugen unbeständig, in kaltem Wasser unlöslich oder für Lebensmittel nicht zugelassen sind.

Mit den im Einsatz befindlichen Prüfmethode werden sowohl die Zusammensetzung als auch die mechanische Belastung des Reinigungsbades möglichst betriebsnah simuliert. Die Schaumerzeugung erfolgt durch Umpumpen

bzw. Aufspritzen der Testlösung auf die Flüssigkeitsoberfläche gleicher Zusammensetzung mit einem ausreichenden Energie- und Lufteintrag. Die Testlösung ist so zusammengesetzt, dass sie die wesentlichen Schaumerzeuger und Stabilisatoren, die in der Praxis auftreten können, enthält. Durch Zugabe von Prüfsubstanzen (z. B. Entschäumern) kann deren Einfluss auf den Schaum untersucht werden. Eine Simulation der Betriebszustände erfolgt durch Variation der Umpumpgeschwindigkeit, der Fallhöhe, der Temperatur und des Strahldurchmessers. Eine gängige Methode ist der Zirkulationstest.

Reiniger für den gewerblichen Bereich

Industrielle und institutionelle (I&I) Reiniger decken ein breites Feld von Anwendungen ab, die von der Reinigung gewerblicher Küchen in Hotels, Krankenhäusern und Kantinen über die Gebäudereinigung bis zur Behandlung von Metalloberflächen und zur Autowäsche reichen. Wichtige Anwendungen, deren Schaumproblematik auch in anderen Teilen dieses Kapitels beschrieben wird, sind

- Reinigungsmittel für die Molkerei-, Fleischerei- und Bäckereireinigung
- Reinigungsmittel für die Flaschenwäsche oder für Prozessanlagen, wie z. B. von Tanks und Rohren
- Waschmittel für das Hotel- und Gaststättengewerbe und das Gesundheitswesen (Arztpraxen, Krankenhäuser, Altenheime)
- Geschirrspülmittel für Restaurants und Bars, Kantinen, Krankenhäuser

- Oberflächenreinigungsmittel für Fußböden, Gebäude, Fassaden, Fenster und universelle Oberflächen
- Reinigungsmittel für das Transport- und Verkehrswesen, wie Pkw, Lkw und öffentliche Verkehrsmittel, Eisenbahn und Schiene, Flugzeuge und Schiffe
- Metallbearbeitung, d. h. die Reinigung und Entfettung von Oberflächen, wie z. B. in der Galvanoindustrie

Reinigungsarbeiten im I&I-Bereich erfolgen meist durch professionelles Fachpersonal unter Einsatz spezieller Maschinen. Gerade der Einsatz von Reinigungsmaschinen erfordert eine spezielle und sorgfältige Kontrolle des Schaumverhaltens. Auch hier sind grundsätzlich zwei Fälle zu unterscheiden:

- Schaum wird während des Reinigungsvorgangs bewusst und kontrolliert erzeugt, wie z. B. bei der Reinigung von Teppichböden. Dabei wird die Eigenschaft des Schaums als Schmutzträger genutzt.
- Die Entstehung von Schaum muss möglichst unterdrückt werden, da er den Reinigungsprozess massiv stört. Dies ist vor allem bei Sprühreinigungsverfahren der Fall, bei denen ein hoher Energieeintrag zu einer so starken Schaumbildung führen kann, dass die Reinigungsleistung extrem beeinträchtigt wird. Auch überall dort, wo ein klarer, tropfenfreier Ablauf gefordert wird, ist Schaum störend.

Zur Schaumstabilisierung ist zum einen das eingesetzte Tensidsystem, zum anderen die jewei-

ge Schmutzfracht verantwortlich. Insbesondere synthetische und natürliche Polymere, wie z. B. Proteine, können zu starker Schaumbildung beitragen. Während bei der Zusammenstellung der jeweiligen Reinigerformulierung stets ein Kompromiss zwischen Entfettungs-, Emulgier-, Schmutztrage- und Schaumvermögen angestrebt und eingestellt wird, sind die natürlichen „Schaumgeneratoren“ in Qualität und Quantität häufig nicht vorhersehbar. Dies stellt hohe Anforderungen an das Tensid- bzw. Entschäumersystem der jeweiligen Formulierung, zumal auch weitere Parameter wie Temperatur, pH- und Elektrolytgehalt Einfluss auf das Schaumverhalten haben. Zur Schaumbeurteilung werden in der Tensid- und Formulierungsentwicklung neben Inhouse-Methoden auch die bekannten Standardprüfmethoden eingesetzt.

5.3 Schaumfreie Systeme

Schaum ist unerwünscht und soll vermieden oder zerstört werden

In vielen industriellen Prozessen kann das Auftreten von zuviel Schaum zu erheblichen Störungen und sogar zum Abbruch des Prozesses führen oder wichtige Produkteigenschaften auf nicht tolerierbare Weise beeinträchtigen. In diesen Fällen muss der Schaum wirksam und zuverlässig auf ein Mindestmaß reduziert werden. Ursachen für die unerwünschte Schaumbildung sind entweder über Rohstoffe eingetragene grenzflächenaktive Substanzen, die je nach Herkunft und Qualität der Rohstoffe nach

Art und Menge unterschiedlich sein können, oder Tenside, deren Zusatz in diesem oder in vorangegangenen Prozessschritten erforderlich ist. Beispielhaft hierfür werden Papier- und Papierfaserherstellung, Textilverbehandlung, -färbung, -druck und -ausrüstung, Metallbearbeitung, wässrige Lacksysteme sowie die Zuckerherstellung näher beschrieben.

Herstellung von Papierfasern

Die Papierfaser ist der Rohstoff für Papier und Karton. Sie wird frisch aus Holz erzeugt oder aus Altpapier wiedergewonnen. Für die Herstellung von Papier oder Karton wird sie zu einer Fasersuspension, der Pulpe, aufbereitet. Schaum tritt in jenen Prozessschritten auf, in denen Tenside zugesetzt oder gebildet werden, und bei denen durch mechanische Einwirkung Luft in die Fasersuspension eingetragen wird.

Faserherstellung aus Holz

Der Aufschluss von Faserrohstoffen besteht aus der möglichst weitgehenden Zerstörung des Lignins, das im Holz die Kittsubstanz zwischen den Fasern bildet. Dies geschieht entweder mechanisch, wobei Holzstoff gebildet wird, oder chemisch, wodurch Zellstoff entsteht. Bei dem chemischen Sulfat-Zellstoffverfahren entsteht sulfoniertes Lignin, das oberflächenaktive Eigenschaften besitzt. Das sulfonierete Lignin gelangt zusammen mit anderen gelösten organischen Verbindungen in die Zellstoff-Ablauge und kann dort Schaumprobleme verursachen.

Das Harz im Holz wird entfernt, indem die Holzschnitzel in stark alkalischer Lösung gekocht werden. Bei diesem Prozess wird das verseifbare Harz in stark schäumende Fett- und

Harzseifen umgewandelt. Um die Netzwirkung der alkalischen Lösung zu erhöhen und um die verseiften und nichtverseiften Harze zu emulgieren oder dispergieren und damit leichter entfernbare zu machen, werden zusätzlich Tenside eingesetzt.

Faserherstellung aus Altpapier

Altpapier wird durch Mischen mit Wasser aufgelöst, in der Auflösetrommel zerfasert und von Fremdstoffen grob gereinigt. Danach folgt das Ablösen des größten Teils der Druckfarbe durch das Deinking (vgl. Kap. 5.1).

Beim Flotationsprozess wird Luft in die Suspension des Altpapiers in hartem Wasser eingeblasen. Die Haftung zwischen der Luft in den Blasen und den Druckfarbenpartikeln ist aber nicht ausreichend, um die Partikel mit nach oben zu reißen. Deshalb wird Natriumseife (oder auch andere Tenside) zugesetzt. Die Natriumseife lagert sich mit ihrer Kohlenwasserstoffkette an die Druckfarbenpartikel an und zeigt mit ihrem anionischen Kopf nach außen. Die Calcium-Ionen des Hartwassers verdrängen nun die Natrium-Ionen und es bildet sich um die Druckfarbenpartikel eine klebrige, hydrophobe Lage aus Kalkseife. Die derart umhüllten Partikel heften sich an die Luftblasen, bekommen Auftrieb und bilden an der Oberfläche der Flotationszelle einen stabilen Schaum, der mechanisch oder durch Überlauf entfernt werden kann.

Eine hohe Turbulenz beim Einblasen der Luft fördert die Bildung kleiner Luftblasen, was auch die Wahrscheinlichkeit der Anlagerung von Druckfarbenpartikeln erhöht. Andererseits er-

hört sich bei zunehmender Turbulenz aber die Gefahr, dass Druckfarbenpartikel wieder abreißen. Durch die Konstruktion der Flotationsanlage und die Art der Zusätze wird der Prozess optimiert.

Herstellung der wässrigen Fasersuspension (Pulpe)

Nach der Stoffaufbereitung wird die Fasersuspension verdünnt und mit weiteren Roh-, Füll- und Hilfsstoffen vermischt. In modernen Anlagen wird kontinuierlich mit Rührwerken und Pumpen gemischt. Höchst effektives Mischen kann erreicht werden, indem verschiedene Flüssigkeiten durch dieselbe Pumpe gefüllt werden. Um Schaumbildung zu verhindern, ist ein Lufteintrag beim Rühren und Pumpen zu vermeiden.

Die Eigenschaften des Schaums hängen im Wesentlichen davon ab, welches Holz eingesetzt wurde. Nadelholz führt zu einer starken Bildung von Oberflächenschaum, der durch sulfoniertes Lignin stabilisiert wird. Laubholz liefert einen höher viskosen Schaum, zu dessen Stabilisierung neben sulfoniertem Lignin auch Polyhydroxyaldehyde (Zucker) beitragen. Als typische Entschäumer finden Formulierungen von Mineralöl mit N,N'-Ethylenbisstearamid, Silikonöle und Alkoholalkoxylate Verwendung.

Papierherstellung

Papier ist ein verfilztes Blatt aus natürlichen Fasern. Zur Herstellung wird eine wässrige Suspension von Fasern und Hilfsstoffen auf ein Sieb aufgebracht, entwässert und gepresst. Durch Leimen und Streichen wird anschließend die Oberfläche veredelt. Einzelschritte der

Papierherstellung sind ausgehend von der Fasersuspension (Pulpe):

- der Stoffauflauf
- Blattbildung
- Pressen und Trocknen
- Oberflächenveredelung

In den ersten drei Schritten wird die Fasersuspension gleichmäßig verteilt auf das umlaufende Sieb der Papiermaschine aufgetragen und anschließend zur Blattbildung entwässert. Das Papierblatt wird durch Pressen senkrecht zur Blattoberfläche verdichtet. Wärmezufuhr erhöht den Trockengehalt des Papiers von maximal 55% nach dem Pressen auf bis zu 94%. Luft in der Fasersuspension stört die Gleichmäßigkeit des Blattes und muss deshalb entfernt werden. Dies kann durch eine mechanisch-thermische Entlüftung erfolgen oder durch den Zusatz von Entschäumern bzw. Entlüftern.

Der auf dem Siebwasser durch Tenside stabilisierte Oberflächenschaum hat einen Luftgehalt von 0,5 - 5 Vol%. Als Entschäumer werden hier in der Regel Alkoholalkoxylate und deren Mischungen mit Paraffinöl verwendet. Als Prüfmethode geeignet ist die Bestimmung des Schaumwertes im Papierstoff durch Kompressionsmessung oder, in stärker praxisorientierten Systemen, z. B. in einer „Schaumrinne“.

Mechanisch eingetragene und in der Papiermasse und im Siebwasser eingeschlossene Luft (Mikrobläschen) wird durch die Fasern, Hemicellulose und Füllstoffe stabilisiert. Dieses System zeichnet sich durch eine hohe Oberflä-

chenspannung (ca. 65 mN/m) und einen Luftgehalt von 0,5 - 5 Vol% aus. Hier werden als Entschäumer/Entlüfter vor allem Fettalkoholdispersionen eingesetzt, wie z. B. ein Dispersionsentschäumer bestehend aus 27% langkettigem Fettalkohol (C20 und größer), 1,5% PEG 6000, 1,5% Polysorbat 20 und 70% Wasser. Die Prüfung der Wirksamkeit der Entlüfter kann durch Ultraschallmessung erfolgen, bei der sich die detektierte Frequenz mit zunehmendem Gehalt an eingeschlossener Luft erhöht.

Bei der Oberflächenveredelung unterscheidet man zwischen „Leimung“ und „Streichen“. Bei der Leimung von Papier werden Hilfsstoffe wie Stärke und Latex aufgebracht, um die Feuchtigkeitsaufnahme zu regulieren und die Dimensionsstabilität zu verbessern. Beim Streichen von Papier wird eine Schicht aus Pigmenten, Bindemitteln und Hilfsstoffen aufgetragen, um die Oberfläche zu ebnen und die Druckbarkeit zu verbessern.

Bei der Herstellung der Streichfarbe aus Pigmenten, Bindemitteln und Hilfsstoffen kann es während des Pumpens oder Siebens zu Schaumproblemen kommen. Diese sind besser durch Maßnahmen zur Verhinderung des Lufteintrages zu lösen als durch den Einsatz von Entschäumern, da deren Wirkung wegen der hohen Viskosität der Streichfarbe begrenzt ist. Beim Einsatz von Entschäumern handelt es sich in der Regel um Fettalkoholalkoxylate und deren Mischungen mit Paraffinöl sowie Silikonöle.

Bei dieser Art von Schaum, der aus Coatingmasse und 0,2 - 5 % eingeschlossener Luft be-

steht, wird als Prüfmethode z. B. eine Dichtemessung mit Hilfe eines Pyknometers verwendet.

Textilvorbehandlung

Bei der Vorbehandlung wird die Rohware (Gewebe oder Maschenware) so aufbereitet, dass sie in guter Qualität gefärbt, bedruckt oder ausgerüstet werden kann. Dies erfolgt in den Prozessschritten Sengen, Entschlichten, Aufschließen und Abkochen, Bleichen und optisches Aufhellen, Mercerisieren und Laugieren. Abgesehen vom Sengen sind alle anderen Schritte wässrige Prozesse, bei denen trockenes oder feuchtes Textil in eine Flotte mit Prozesschemikalien getaucht oder damit besprüht wird. Bei den Prozessen der Vorbehandlung, wie auch bei dem nachfolgenden Färben, Bedrucken und Ausrüsten, entsteht Schaum dadurch, dass Luft durch mechanisch erzeugte Turbulenzen oder durch das Textil selbst in die Flotte eingetragen und durch oberflächenaktive Substanzen stabilisiert wird. Die Maßnahmen zur Schaumunterdrückung, Entschäumung und Entlüftung hängen also von den verwendeten Maschinen und den durchgeführten Prozessen ab.

Bei der Foulard-Methode (engl. „pad“) befindet sich die Flotte in dem Zwickel zwischen zwei Gummiwalzen. Die Textilbahn wird durch diesen Zwickel geführt und auf ein bestimmtes Feuchtegewicht (Restfeuchte) abgepresst. Das Textil wird also mit der Flotte imprägniert. Hier sind die Schaumbildung und Entlüftung kein großes Problem. Die Flotte wird durch die Foulardierwalzen in den Faserverbund gepresst und die Luft dadurch mechanisch verdrängt.

Bei der Auszieh-Methode (engl. „exhaust“) wird das Textil, der Garnstrang oder der Garnwickelkörper in die Flotte getaucht. Die Prozesschemikalien diffundieren zur Faser und ziehen aus der Flotte auf die Faser auf. In der Flotte mikrodispers verteilte und an den hydrophoben Fasern anhaftende Luftbläschen müssen durch Zugabe eines Entlüfters verdrängt werden. Schaumbblasen in Wickelkörpern verhindern nicht nur das gleichmäßige Aufziehen des Farbstoffes, sondern behindern in Form von Schaumpolstern auch die Flottenzirkulation. Wegen durch heftige Flottenzirkulation (Jet-Verfahren) oder durch die Bewegung der Textilbahnen oder Faserstränge (Jigger und Haspelkufe) verursachten starken Turbulenzen kann es bei den Ausziehverfahren zusätzlich zu überstehendem Schaum kommen. Dieser Schaum führt u. a. durch Aufschwimmen des Textils zur Störung des Warenlaufs und zu unegalen Färbungen, wie z. B. Schleifspuren und Faltenmarkierungen, und muss deshalb vermieden werden.

Bei den Diskontinue-Systemen (Jet, Jigger, Haspelkufe) ist der mechanische Lufteintrag durch die erzeugten Turbulenzen am größten - und damit auch das Schaumproblem. Die hohen Turbulenzen im Jet können sogar dazu führen, dass zugesetzte Entschäumer-Emulsionen nach einiger Zeit nicht mehr wirken, da die hohen Scherkräfte die Emulsion zerstören. Bei den Halbdiskontinue- (Pad Batch, Pad Roll) und Diskontinue-Systemen kann durch geschickte Warenführung die durch Turbulenzen hervorgerufene Schaumbildung minimiert werden. Der Lufteintrag durch das Textil selbst kann aber nicht vermieden werden.

Beim **Entschlichten** werden Schlichtemittel entfernt, die zur Verringerung der Scheuer- und Abriebwirkung beim Weben aufgebracht wurden. Zur Vermeidung von Schaumproblemen werden oberflächenaktive Substanzen als Netzmittel eingesetzt, die das Eindringen der enzymatischen (bei Stärkeschlichten) oder der alkalischen Flotten (bei synthetischen Schlichten) in das Textilgut ermöglichen. Als Entschäumer werden im Allgemeinen Silikonentschäumer verwendet, bei der enzymatischen Entschlichtung auch Alkoholalkoxylate und Phosphorsäureester.

Beim **Aufschließen und Abkochen** wird die Rohbaumwolle unter stark alkalischen Bedingungen und unter Zusatz von Netz-, Wasch- und Komplexmitteln gekocht. Dabei werden eine Vielzahl von Faserbegleitstoffen wie Hemicellulose, Lignine, Pektine, Fette, Wachse, wasserlösliche Naturfarbstoffe und Samenschalen entfernt. Der Prozess erhöht die Saugfähigkeit des Textils. Die üblichen Prozesschemikalien für das Aufschließen und Abkochen bewirken, dass sich in der Flotte kein oder nur wenig Schaum entwickelt. Die Schaumarmut wird durch die Verwendung von Alkoholethoxylaten mit tiefem Trübungspunkt oder von endgruppenverschlossenen Alkoholalkoxylaten erreicht.

Beim **Bleichen und optischen Aufhellen** erzeugen Stabilisatoren für Wasserstoffperoxid und Netzmittel Schaum. Eingesetzte Entschäumer müssen oxidationsstabil sein. Bei der Pad Batch-Kaltlagerbleiche und beim Pad Batch-oxidativen Aufschluss werden Alkoholalkoxylate und Phosphorsäureester verwendet, bei der Hypo-

chlorit-Bleiche Entschäumer auf Basis organischer Ester.

Mercerisieren ist die Behandlung der Cellulosefaser mit Natronlauge hoher Konzentration (bis 300g NaOH/kg) in einer Mercerisiermaschine mit dem Ziel, die Faser für hohen Glanz und verstärkte Farbaufnahme zu modifizieren.

Laugieren ist die spannungslose Behandlung mit Natronlauge (15-30 °B bei 10-20 °C) im Foulard plus Breitstreckenwalzaggregat. Bei diesen hohen Laugenkonzentrationen und Viskositäten der Flotte werden als Netzmittel Alkoholsulfate eingesetzt und als Entschäumer Phosphorsäureester.

Der Schaum, der durch das Einführen des Textils in die Flotte beim Jigger oder durch das Aufschlagen des Textilstrangs in die Flotte bei der Haspelkufe entsteht, kann im Labor durch das Lochscheiben-Schlagverfahren gut simuliert werden. Für die Prüfung der Wirkung von Entlüftern gibt es unterschiedliche Inhouse-Methoden. Eine Methode besteht darin, eine Wickelspule mit hydrophobem Rohbaumwollgarn in einen die Flotte enthaltenden Messzylinder zu geben. Die anfängliche Erhöhung des Flüssigkeitsniveaus nimmt mit dem Verdrängen der Luft in der Garnwickelspule allmählich ab. Ein Entlüfter ist umso effizienter, je schneller das Flüssigkeitsniveau absinkt und umso effektiver, je tiefer es am Ende zum Stehen kommt.

Textilfärbung

Das Färben von Textilien beinhaltet drei Prozessschritte: die Farbgebung durch das Aufziehen des Farbstoffes auf oder in die Faser, die Fixierung des Farbstoffes und das Auswaschen des

Textils, wobei nicht aufgezogener und fixierter Farbstoff entfernt wird. Die Verfahren, Maschinen und Apparate sind ähnlich den im Abschnitt „Textilvorbehandlung“ beschriebenen.

Beim Färben unterscheidet man, wie bei der Textilvorbehandlung, zwischen Foulardier- und Auszieh-Verfahren. Bei den Foulardier-Verfahren wird das Textil zunächst im „Foulard“ mit der Flotte imprägniert (foulardiert, geklotzt) und dann der Farbstoff durch Lagern (Pad Batch- und Pad Roll-Verfahren), Dämpfen (Pad Steam-Verfahren) oder durch Trockenhitze (Pad Dry-Verfahren) fixiert. Beim Ausziehverfahren wird das Textil in die Flotte permanent (Unterflottenverfahren, Hochtemperatur-Wickelspulen-Färbung) oder wiederkehrend getaucht (Jigger und Haspelkufe) oder besprüht (Jet-Färbung). Der Farbstoff zieht hier aus der Flotte auf die Textilfaser auf. Der Lufteintrag erfolgt in der gleichen Weise wie bei der Textilvorbehandlung und wird stabilisiert durch Färbereihilfsmittel wie Netzmittel, Egalisierungsmittel und Dispergatoren für die Dispersfarbstoffe.

Zur Schaumkontrolle werden neben schaumarmen Färbereihilfsmitteln Entschäumer eingesetzt. Beim Färben wird allgemein ein Temperaturprogramm durchlaufen. Ausgehend von der Raumtemperatur wird die Temperatur allmählich erhöht, z. B. bis auf 130 °C bei der Polyester HT-Färbung in der Druckapparatur, über eine bestimmte Dauer hinweg gehalten und wieder abgesenkt. Dabei muss ein Entschäumer im gesamten Temperaturbereich wirksam sein.

Beim Foulard-Verfahren nach dem Pad Batch-, Pad Roll- oder Thermosol-Prozess werden Ent-

lüfter auf Basis Polyethylenglykolether, Phosphorsäureester, Alkoholethoxylaten und Mineralöl-Emulsionen eingesetzt. Im Ausziehverfahren auf der Haspelkufe, dem Jet und dem Jigger finden als Entschäumer Phosphorsäureester, Alkoholalkoxylate, Mineralöl-Emulsionen und in schwierigen Fällen auch Silikonöl-Emulsionen Verwendung. Beim Hochtemperaturfärben im Jet sind es vor allem Mineralöle, Carbonsäureester, Silikonöle und Phosphorsäureester, die eine hohe Wirksamkeit aufweisen, ohne den Prozess zu stören.

Beim Färben und Drucken von Teppichen bringt das voluminöse Fasersystem des Teppichs viel Luft in die Flotte und hält sie fest eingeschlossen. Zur Entlüftung des Textilgutes werden Produkte mit entlüftender Eigenschaft eingesetzt. Um Fleckenbildung zu vermeiden, muss der Entschäumer/Entlüfter leicht dispergierbar sein und eine hohe Flottenstabilität aufweisen. Wegen der Gefahr von Silikonflecken und der nachteiligen Wirkung von Silikonemulsionen auf die Flammschutz-Ausrüstung werden ölbasierende Silikon-Entschäumer ungern eingesetzt. Allgemein werden Entschäumer auf Basis von Mineralölen, Alkoholalkoxylate oder aber organomodifizierte Siloxane verwendet.

Untersuchungen zur Schaumbildung und zur Wirkungsweise von Entschäumern im Jet werden oft in einer Labor-Jet-Anlage durchgeführt. Die TEGEWA-Arbeitsgruppe Färbereihilfsmittel hat mehrere Ringversuche durchgeführt, findet aber nur in der Tendenz brauchbare Übereinstimmung. Trotzdem kommt sie zu dem Ergebnis, dass über die Simulierung einer Hochtem-

peratur (HT)-Färbung im Labor-Jet eine reproduzierbare vergleichende Prüfung und Bewertung von Entschäumern möglich ist [17]. Außerdem kann die Schaumentstehung und Entschäumerwirkung im Jet, inklusive der Untersuchung des Temperatureinflusses, mit dem Zirkulationstest sehr gut simuliert werden.

Textildruck und Textilausrüstung

Die letzten Stufen im Prozess der Textilveredelung sind das Drucken und Ausrüsten. Das **Drucken** ist ein örtliches Färben, das ein Muster (Dessin) auf dem Textil erzeugt. Es kann nach verschiedenen Verfahren durchgeführt werden: Rouleauxdruck, Flachfilmdruck, Rotationsfilmdruck, Transferdruck oder Inkjet-Druck. Diesen Drucktechniken liegt in der Regel die gleiche Operationsfolge - Drucken, Dämpfen und Nachwaschen - zugrunde.

Bei der Herstellung der Druckpasten wird durch Rühren und Homogenisieren Luft eingearbeitet. Diese Lufteinschlüsse in der Druckpaste führen zu „reservierten“ Punkten auf dem Textil und müssen durch Einsatz von Entlüftern/Entschäumern entfernt werden. Diese basieren in der Regel auf Phosphorsäureestern, langkettigen organischen Estern und Mineralöl-Emulsionen.

Bei der **Ausrüstung** werden dem gefärbten oder bedruckten Textil durch das Aufbringen von Effektchemikalien zusätzliche Eigenschaften verliehen. Hydrophiliermittel ergeben einen weichen Griff, Hydrophobiermittel dienen der Wasser- und Schmutzabweisung. Weitere Zusätze sind Antimikrobika, Antistatika, Flammschutzmittel und UV-Licht-Absorber zum Schutz des Textils.

Die Verfahren für das Ausrüsten sind ähnlich oder gleich wie bei der Vorbehandlung und beim Färben und verursachen die gleichen Schaumprobleme. Allgemein werden die Entschäumer eingesetzt und die Schaumprüfmethoden angewendet, die im Abschnitt „Textilfärbung“ beschrieben sind. Bei der Ausrüstung mit Weichmachern wie quaternären Ammoniumverbindungen oder Polyethylen/Acrylharz-Emulsionen kann Schaum auftreten, wenn die Flotte kräftig umgewälzt wird. Hier werden Silikonentschäumer und Mineralöl-Emulsionen verwendet. Bei der Ausrüstung mit Antistatika tritt Schaum aufgrund der geringen Oberflächenspannung und der hydrophoben Eigenschaft der Antistatika auf. Entschäumer auf Basis von Phosphorsäureestern weisen hier eine hohe Wirksamkeit auf, ohne den Prozess zu stören.

Metallbearbeitung

Die meisten Prozesse in der Metallbearbeitung erfordern Schmierung und Kühlung. Dies wird durch den Einsatz spezieller Flüssigkeiten erzielt, deren Zusammensetzung für einzelne Prozesse beträchtlich variiert. Wichtige Formulierungen sind:

- O/W-Emulsionen, durch deren Verwendung die schmierenden Eigenschaften von Öl mit dem Kühleffekt von Wasser kombiniert werden können. Sie enthalten hydrophile Emulgatoren, die zu Schaumbildung führen können.
- Wässrige Lösungen, die Korrosionsinhibitoren und Polyalkylenglykole oder deren Derivate enthalten.

Diese Formulierungen enthalten eine Vielzahl von Additiven zur Optimierung des Korrosionsschutzes, zur Verbesserung der Schmier- und Netzeigenschaften, zur Verhinderung des Bakterienwachstums und zur Schaumkontrolle. Bei der Metallbearbeitung treten generell hohe Scherkräfte auf, die eine Schaumbildung fördern. Schäumen ist unerwünscht, weil es die Kühlung und Schmierung beeinträchtigt. Außerdem lässt sich der bearbeitete Gegenstand schwerer erkennen. Auch im Rückführsystem der Flüssigkeit kann die Schaumbildung Probleme verursachen.

In Formulierungen von Metallbearbeitungsflüssigkeiten muss daher gutes Emulgier- und/oder Netzvermögen mit einer möglichst geringen Tendenz zur Schaumbildung kombiniert werden. Das wird dadurch erreicht, dass solche Formulierungskomponenten, insbesondere die Emulgatoren und Netzmittel, ausgewählt werden, die das Schäumen minimieren. Dennoch entstehender Schaum kann dann durch Verwendung von Entschäumern noch weiter reduziert werden.

Entschäumer neigen dazu, ihre Leistungsfähigkeit nach einer gewissen Zeit zu verlieren, weil sie durch Flotation oder durch Filter, die zur Reinigung der zurückgeführten Flüssigkeit dienen, entfernt werden. Diesen Effekt zu reduzieren, ist ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Auswahl der Entschäumer.

Die Belüftung, d. h. der Einschluss kleiner Luftblasen in der Flüssigkeit, ist ein wesentlicher Aspekt bei der Schaumbildung. Daher sollten Metallbearbeitungsflüssigkeiten in Bezug auf beides optimiert werden: Entschäumung und Entlüftung.

Bei Anwendern und Formulierern von Metallbearbeitungsflüssigkeiten ist eine Vielzahl von Prüfmethoden im Einsatz. Für allgemeine Entwicklungsarbeiten sind folgende Methoden besonders geeignet:

- Schütteltests haben den Vorteil, dass sie schnell und einfach sind. Sie simulieren zwar nicht den Metallbearbeitungsprozess, sind aber weit verbreitet und erfahrene Anwender können damit die Schaumbildung in der Praxis recht gut abschätzen. Ein geeignetes Beispiel kann in ASTM D 3601 gesehen werden.
- In Mischtests wird die Flüssigkeit mit Hilfe eines Labormischers gerührt. In manchen Fällen wird zusätzlich Luft eingeleitet. Wegen der hohen Scherung ist dieser Test für Anwendungen in der Metallbearbeitung besonders geeignet. Der amerikanische Standard ASTM 3519 beschreibt einen solchen Mischtest.
- Beim Zirkulationstest wird die Schaumbildung simuliert. Eine genormte Version stellt DIN EN 14371 dar.

In der Metallbearbeitungsindustrie werden solche Standardtestmethoden weiter modifiziert, damit sie den speziellen Bedingungen in der Praxis noch besser entsprechen. [18]

Wässrige Lacksysteme

In wässrigen Lacksystemen sind zwei grundsätzlich verschiedene Eigenschaften eines Entschäumers von Bedeutung: die entschäumende und die entlüftende Wirkung. Es geht dabei

einerseits um die Zerstörung von Makroschaum im aufgetragenen Lack (Entschäumung), andererseits um die Vermeidung von Mikroschaumbläschen, die während des Lackiervorgangs eingeschlossen werden (Entlüftung). Letzteres wird auch mit dem Begriff Mikroschaum in Verbindung gebracht. Die gängigen Entschäumer wirken dabei zu einem gewissen Teil auch immer der Entstehung von Mikroschaum entgegen.

Neben der entschäumenden Wirkung sind für einen Entschäumer in Lackformulierungen die Verträglichkeit mit dem Bindemittel und insbesondere die Entstehung von Oberflächendefekten (Kraterbildung) zu vermeiden. Der Entschäumer ist im allgemeinen hydrophob, spreitet leicht an Grenzflächen, besitzt eine niedrige Oberflächenspannung, ist im Medium nicht löslich und im Idealfall in Form von kleinen Tröpfchen fein verteilt. Weiterhin werden auch hydrophobe Festkörper (wie hydrophobisierte Kieselsäure) als Entschäumer verwendet.

Große Bedeutung besitzen Entschäumer auf Basis von Mineralöl, Silikonöl oder hydrophoben Alkoholalkoxylaten. Die klassischen, Aromaten enthaltende Mineralöle werden heute wegen ihrer ökologischen und physiologischen Bedenklichkeit weniger häufig eingesetzt. Allerdings bringt der Wechsel zu aliphatischen Mineralölen oft einen Verlust an Glanzgrad z. B. von wässrigen Dispersionslacken mit sich.

Eine wichtige Untergruppe von Entschäumern sind organomodifizierte Silikone, von denen die polyethermodifizierten Polysiloxane besondere Bedeutung besitzen. Die Modifizierung reduziert

die Unverträglichkeit des Silikons, was vor allem in Lack- und Druckfarben Vorteile zeigt. Die Wahl des optimalen Entschäumers hängt in starkem Maße von der Art des Lackes und den zugesetzten Additiven ab. Umfangreiche Praxistests sind daher essentiell für die gezielte Entwicklung neuer Lacksysteme. Typische Anwendungstests sind z. B. Rühr-, Ablauf- und Rollentests. Bei Rührtests wird durch den Eintrag mechanischer Energie Luft in ein System eingetragen und die Volumenerhöhung gemessen. Zusätzlich kann die Probe aus einem Rührtest anschließend auf eine feste, schief stehende Oberfläche gegossen werden. Eine anschließende optische Bewertung des resultierenden Lackfilms lässt Rückschlüsse auf die Wirksamkeit der Entschäumer zu. Bei Rollentests wird eine Farbe mit Hilfe einer Rolle auf eine definierte Oberfläche aufgetragen und anschließend die Wirksamkeit des Entschäumers durch Vergleich mit Farbtafeln bewertet.

Zuckerherstellung

Zucker wird heute im Wesentlichen aus Zuckerrüben und Zuckerrohr gewonnen. Zukünftig kann auch die Herstellung von Zucker und Zuckerfolgeprodukten (Ethanol) durch Spaltung von Zellulose (Stroh) oder Stärke (Mais) eine wichtigere Rolle spielen. Neben der Verwendung in der Lebensmittelindustrie wird Zucker zunehmend auch zur Herstellung von Grundchemikalien wie z. B. Ethanol, Essigsäure oder Milchsäure eingesetzt.

Bei der Verwendung von Zuckerrüben als Rohstoff werden die Rüben zuerst gewaschen. Bereits hier entsteht durch anhaftende Erdpartikel (Clay) und durch das Ausbluten von Sa-

poninen (Glykoside mit Tensideigenschaften) aus beschädigten Rüben Schaum, der durch geeignete Entschäumer gedämpft werden muss. Anschließend werden die Rüben zerkleinert und im so genannten Zuckerhaus mit heißem Wasser extrahiert. Diese Extraktion wird durch Schaum, der sich infolge hoher Saponinkonzentrationen bildet, stark behindert, weshalb erneut Entschäumer zugesetzt werden müssen.

Bei der Verwendung von Zuckerrohr als Zuckerquelle werden meist keine Entschäumer benötigt, da das Rohr nur geringe Anteile an Schaumbildnern enthält. Jedoch werden bei der Laugung oft Netzmittel zugegeben, um eine gute Extraktion des Rohrs zu gewährleisten. Diese können bei der Zuckerkristallisation, bei der Raffination oder bei der Vergärung zu Alkohol zu Schaum führen, der dann durch Entschäumer gedämpft werden muss.

Da der so gewonnene Zucker zu einem großen Teil für Lebensmittel verarbeitet wird, unterliegen die Hilfsstoffe bei der Zuckerherstellung gesetzlichen Zulassungen. In den USA sind Regulierungen für Entschäumer in FDA 21CFR §173.340 aufgeführt. Stoffe mit Lebensmittelkontakt werden durch die EU-Leitlinie 1935/2004 abgedeckt. Einzelne EU-Länder können aber auch noch eigene nationale Gesetzgebungen haben, man denke zum Beispiel an die Technische Hilfsstoff-Verordnung (THV) in Deutschland oder die französische Positivliste.

In der Zuckerrübenwäsche typischerweise eingesetzte Entschäumer sind Mischungen aus Mineralöl, nativen Ölen, EO/PO-Blockpolyme-

ren und Fettalkoholen, mit in dieser Reihenfolge abnehmenden Mengen. In der Extraktion dominieren Formulierungen auf Basis von EO/PO-Blockpolymeren und Fettsäuren und deren Ester. Zur Abschätzung ihrer Wirksamkeit werden in der Regel die üblichen Standardprüfmethoden verwendet.

Reinigung

Schaumfreie Anwendungen bei Reinigung im gewerblichen Bereich wurden schon beschrieben (S. 32).

6. Schaumprüfmethoden

Üblicherweise werden die Schaumprüfmethoden nach folgenden Gesichtspunkten betrachtet und klassifiziert:

- Art der Testprobe
- Methode der Schaumerzeugung
- Methode der Schaummessung

Testprobe

In manchen Fällen ist es vorteilhaft, das unter Anwendungsbedingungen vorliegende System direkt zu prüfen. Dann ist die Testprobe durch das zu untersuchende Problem definiert, wie z. B. bei einer Waschlösung oder einer Metallbearbeitungsflüssigkeit. Oft ist man jedoch an allgemeinen Eigenschaften von Tensiden, Entschäumen oder deren Mischungen interessiert. Dann ist es üblich, Standards für die Tensidkonzentration und die Wasserhärte zu definieren. Dabei sollte man schon bei der Festlegung der Testbedingungen eine Vorstellung vom Einfluss der Konzentration und der Wasserhärte auf den Schaum haben.

Für vertiefte Untersuchungen ist es interessant, die Konzentration des Tensids im Zusammenhang mit dessen cmc zu betrachten. Außerdem kann bei hohen Tensidkonzentrationen das Schaumverhalten auch durch die zunehmende Viskosität beeinflusst werden.

Schaumerzeugung

Bei der Schaumerzeugung wird zwischen statischen und dynamischen Methoden unterschieden. Bei den **statischen Methoden** wird der Schaum zunächst erzeugt und anschließend zerfallen gelassen. Die Schaumeigenschaften werden typischerweise als eine Funktion der Zeit, beginnend nach der Schaumerzeugung, gemessen. Bei den **dynamischen Methoden** erfolgt die Schaumerzeugung kontinuierlich, was zur Einstellung des Gleichgewichtszustands führen kann, in dem die Geschwindigkeiten der Schaumbildung und des Zerfalls gleich sind. Die dynamischen Methoden ermöglichen sowohl eine Messung im Gleichgewichtszustand als auch der Geschwindigkeit der Schaumbildung.

Gängige statische Methoden

- Ausfließen (z. B. Ross-Miles)
- Schütteln
- Schlagen (z. B. Lochscheiben-Verfahren)
- Rühren
- Bürsten
- Keimbildung von Gasblasen
- Reiben
- Schaumspender

Gängige dynamische Methoden

- Luft einleiten (Sparging)
- Umpumpen über Düse oder Sprühkopf
- Rühren

Eine weitere Möglichkeit der Klassifizierung der Schaumerzeugungsmethoden kann auf Basis der zugrunde liegenden Scherung erfolgen. In der Praxis ist es jedoch schwierig, quantitative Daten zu den entsprechenden Schergeschwindigkeiten zu erhalten. Auch eine Klassifizierung nach der Blasengrößenverteilung ist möglich.

Bei vielen Prüfmethoden wurde die Art der Schaumerzeugung durch eine möglichst genaue Simulation der in der Praxis vorliegenden Prozesse entwickelt.

Messung von Schaumeigenschaften

Die übliche Art und Weise der Schaummessung besteht darin, die Schaumhöhe in Abhängigkeit von der Zeit zu messen. Dabei werden sowohl manuelle als auch automatische Methoden verwendet. Zur Beschreibung der Schaumstabilität gibt es eine ganze Reihe unterschiedlicher Untersuchungsmethoden und Parameter. Oft wird das Schaumvolumen nach einer festen Zeit gemessen. Alternativ kann Schaumstabilität als Halbwertszeit ausgedrückt werden, d. h. die Zeit, die benötigt wird, bis der Schaum zur Hälfte seines ursprünglichen Volumens abgebaut ist. Für viele Anwendungen sind aber nicht nur die Schaummenge, sondern auch die Schaumeigenschaften von Bedeutung. Die Charakterisierung von Schäumen kann auch mit Hilfe der Blasengrößenverteilung, der Schaumdichte und der Schaumrheologie erfolgen. In vielen Fällen ist aber auch eine visuelle oder sensorische Beurteilung der Schaumqualität ein zwar teilweise subjektiver, aber durchaus aussagekräftiger Parameter.

Prüfmethoden und Anwendungsgebiete

In den verschiedenen Anwendungsgebieten, in denen Schaum eine Rolle spielt, sind die Zielsetzungen bei der Erzeugung, Regulierung oder Zerstörung von Schaum oder bezüglich der Schaumqualität zum Teil sehr unterschiedlich – und damit auch die Anforderungen an die Schaumprüfmethoden und deren Messgrößen.

In den letzten Jahren gab es Fortschritte bei der Entwicklung automatisierter Methoden und es gibt eine Reihe von Instrumenten hierfür auf dem Markt [19 – 21]. Schaum wird hergestellt durch Rühren oder Lufteintrag; die Parameter können angepasst werden, um für die jeweils relevante Anwendung zu passen. In einem typischen Testverfahren wird die Schaumbildung so lange verfolgt, bis die Schaummenge stabil bleibt. Dann wird der Lufteintrag oder das Rühren unterbrochen und der Zerfall beobachtet. Ergänzend zum Schaumvolumen kann auch die Verteilung der Blasengröße durch eine Bildanalyse ermittelt werden oder eine Verteilung des Flüssigkeitsgehalts durch die elektrische Leitfähigkeit. Mit Hilfe eines Modellsystems wurden grundsätzliche Empfehlungen zur Schaumuntersuchung mit dieser Technik entwickelt [22].

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die in den in Kapitel 5 beschriebenen Anwendungsgebieten verwendeten Prüfmethoden und deren Charakteristika.

In **Tabelle 2** sind alle in dieser Broschüre genannten und eine Reihe weiterer, allgemeingängiger Prüfmethoden zusammenfassend dargestellt und kurz beschrieben.

Tabelle 1

Schaumprüfmethode, die in den in Kap. 5 beschriebenen Anwendungsgebieten typischerweise verwendet werden.

Anwendungsgebiete nach Industrien	Prüfmethode Nr* Bezeichnung	Schaumerzeugung	Charakteristische Messgrößen			
			Anschäumverhalten	Schaumvolumen	Schaumstabilität	Schaumqualität
Stark schäumende Systeme						
Flüssige Körperreinigungsmittel	4 DIN 53902-2 9 Inhouse Clariant 14 Inhouse Kao 15 Inhouse Kao	Ausfließen Hände waschen Luft einleiten Rühren	+ +	+ +	+ +	+ +
Rasierschaum	2 DIN EN 13996 14 Inhouse Kao	Rühren Luft einleiten	+ +	+ +	+ +	+ +
Schaumreiniger	1 DIN EN 12728 4 DIN 53902-2 14 Inhouse Kao	Schlagen Ausfließen Luft einleiten	+ +	+ +	+ +	+ +
Beschichtung textiler Flächen	20 Inhouse Synthomer	Rühren		+	+	+
Flotation	29 Inhouse BASF	Luft einleiten			+	+
Löschaum	13 DIN EN 1568,1-4	Luftmitführung (Düse)				**
Schwach schäumende Systeme						
Waschmittel	1 DIN EN 12728 2 DIN EN 13996 3 DIN EN 14371 30 Inhouse Zschimmer & Schwarz 31 Inhouse Zschimmer & Schwarz	Schlagen Rühren Umpumpen Luft einleiten Umpumpen		+ + + +	+ + +	
Reiniger für harte Oberflächen	1 DIN EN 12728 3 DIN EN 14371 15 Inhouse Kao 16 Inhouse Kao 30 Inhouse Zschimmer & Schwarz 31 Inhouse Zschimmer & Schwarz	Schlagen Umpumpen Rühren Umpumpen Luft einleiten Umpumpen		+ + + +	+ +	
Handgeschirrspülmittel	1 DIN EN 12728 4 DIN 53902-2 6 Inhouse BASF 7 Inhouse Sasol 18 IKW-Empfehlung	Schlagen Ausfließen Rühren Rühren/Bürsten Reiben, Bürsten	+ +	+ +	+ +	+ +
Automatische Geschirreiniger	1 DIN EN 12728 2 DIN EN 13996 3 DIN EN 14371 5 Inhouse BASF	Schlagen Rühren Umpumpen Umpumpen		+ + + +	+ +	
Industrielle Flaschenwäsche	1 DIN EN 12728 3 DIN EN 14371	Schlagen Umpumpen		+ +	+	

*) Fortlaufende Nummern der in Tabelle 2 beschriebenen Methoden, **) Löschvermögen

Anwendungsgebiete nach Industrien	Prüfmethode Nr* Bezeichnung	Schaumerzeugung	Charakteristische Messgrößen			
			Anschäumverhalten	Schaumvolumen	Schaumstabilität	Schaumqualität
Schaumarme Systeme						
Herstellung von Papierfasern	1 DIN EN 12728 3 DIN EN 14371	Schlagen Umpumpen		+	+	
Papierherstellung	3 DIN EN 14371 24 Inhouse BASF 25 Inhouse BASF 26 Inhouse BASF 27 Inhouse BASF 28 Inhouse BASF	Umpumpen Rühren Umpumpen, Rühren Schlagen, Schütteln*** Schlagen, Schütteln*** Schlagen, Schütteln***		+	+	
Textilvorbehandlung Textilfärbung Textildruck und Textilausrüstung	1 DIN EN 12728 3 DIN EN 14371 12 Inhouse BASF 30 Inhouse Zschimmer & Schwarz 31 Inhouse Zschimmer & Schwarz	Schlagen Umpumpen Entlüften Luft einleiten Umpumpen		+	+	
Metallbearbeitung, Kühlschmierstoffe	2 DIN EN 13996 3 DIN EN 14371 8 Inhouse Clariant 10 ASTM D 3519 11 ASTM D 3601 14 Inhouse Kao 16 Inhouse Kao 17 Inhouse Kao 19 Inhouse Evonik 30 Inhouse Zschimmer & Schwarz	Rühren Umpumpen Umpumpen Rühren Schütteln Luft durchleiten Umpumpen Schütteln Umpumpen Luft einleiten		+	+	
Wässrige Lacksysteme	3 DIN EN 14371 21 Inhouse MÜNZING 22 Inhouse MÜNZING 23 Inhouse MÜNZING 30 Inhouse Zschimmer & Schwarz	Umpumpen Schütteln Rühren Walzen Luft einleiten		+	+	

*) Fortlaufende Nummern der in Tabelle 2 beschriebenen Methoden, ***) in der Produktionsanlage

Tabelle 2
Schaumprüfmethoden (Kurzbeschreibung)

Prüfmethode	Kurzbeschreibung	Bemerkungen
1 DIN EN 12728	Lochscheiben-Schlagverfahren Bestimmung des Schäumvermögens. Der Schaum wird durch Schlagen einer Lösung in einem Glaszylinder mit einer an einem Schlagstempel befestigten Lochscheibe erzeugt. Messung des Schaumvolumens nach 1, 3 und 5 Minuten.	Einfacher Basistest, parallele Messungen möglich, variabel bei der Auswahl der Belastungen. Speziellere Fragestellungen erfordern weitere Tests. Unzureichende Differenzierung bei schaumarmen Tensiden.
2 DIN EN 13996	Turbinenrührer Bestimmung von Schäumvermögen und Entschäumerwirkung, Variante A: Der Schaum wird durch Rühren (5 Min., 20 °C), erzeugt, anschließend werden Schaum und Lösung in einen Messzylinder gegossen und oberes und unteres Schaumniveau während 15 Minuten gemessen. Die Entschäumerwirkung wird mit verschiedenen Entschäumerkonzentrationen bestimmt. Variante B: Der Schaum wird durch Rühren in definierter Zeit (z. B. 10 Minuten) erzeugt und dabei der Schaumaufbau durch Messsonden ermittelt, anschließend wird der zeitliche Verlauf des Schaumzerfalls (über Messsonden) bestimmt.	Praxisnahe Methode, durch Modifikation in weiterem Anwendungsbereich anwendbar. Praxisnahe Methode, automatisierbare Datenauswertung, selbstreinigender Vorlagebehälter.
3 DIN EN 14371	Zirkulationstest Bestimmung des Schäumvermögens und des Verschäumungsgrades mit Hilfe einer Umwälzeinrichtung (Zahnradpumpe) und Versprühen der Lösung mit einer Düse. Messung der Schaumhöhe während 10 Minuten Umwälzen und weiteren 10 Minuten danach.	Praxisnahe Methode. Auch zur Bestimmung der Entschäumer-Wirkung geeignet. Automatisierbare Datenauswertung.
4 DIN 53902-2	Ross-Miles (modifiziert) Bestimmung des Schäumvermögens. Freies Ausfließen von 500 ml einer Lösung auf die Oberfläche der Lösung bei 50 °C (oder andere geeignete Temperaturen). Messung der Schaumhöhe nach 0,5, nach 3 und nach 5 Minuten.	Einfacher Basistest. Prüfung von Tensiden, Bestimmung des Schäumvermögens. Proben dürfen keine Sedimente oder Trübungen enthalten. Modifiziertes Ross-Miles-Verfahren (vgl. ASTM D1173-07).
5 Inhouse BASF	Geschirrspülmaschine Bestimmung der Schaumdämpfung unter Belastung (z. B. Protein etc.) über einen definierten Temperaturbereich (20 °C bis 65 °C). Ermittelt wird die Anzahl an Sprüharm-Rotationen pro Zeiteinheit.	Praxisnahe Methode für schaumarme Tenside und Formulierungen, automatische Datenauswertung. Variationen der Prozessbedingungen möglich. Indirekte Messung des Schaumvolumens und der Schaumeigenschaften über Krafteinwirkung auf den Sprüharm.
6 Inhouse BASF	Olivenöl-Test Bestimmung der Entschäumer-Wirkung. Unter Rühren wird einer stark schäumenden Tensid-Lösung bzw. Reiniger-Formulierung portionsweise solange Olivenöl zugegeben, bis der gesamte Schaum verschwunden ist.	Einfache Methode zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Handgeschirrspülmitteln.

Prüfmethode	Kurzbeschreibung	Bemerkungen
7 Inhouse Sasol	Miniplate-Test Rühren, Bürsten. Bestimmung des Schaumverhaltens unter Schmutzbelastung. Modifikationen der ursprünglichen Vorschrift [23], von verschiedenen Firmen als Inhouse-Methode benutzt.	Für Handgeschirrspülmittel. Ähnlich wie Plate-Test (Nr. 18), aber benutzt Uhrgläser anstatt Teller, dadurch weniger aufwändig.
8 Inhouse Clariant	Dynamischer Schaumtest Die Tensidlösung wird kontinuierlich durch einen Sprühkopf umgepumpt. Messung des maximalen Schaumvolumens [24].	Gute Methode für schwach schäumende Tenside.
9 Inhouse Clariant	Panel-Test Hände und Unterarme werden nach einer definierten Prozedur gewaschen. Beurteilt werden Anschäumverhalten, Verteilbarkeit des Schaums, Schaummenge, Schaumblasengröße, Schaumcremigkeit und Abwaschbarkeit des Schaums. Es werden immer zwei Produkte miteinander verglichen [25].	Praxisnahe Methode, Reproduzierbarkeit problematisch, hoher Zeitaufwand.
10 ASTM D 3519	Blender-Test Zur Schaumerzeugung wird 30 Sekunden mit (Küchen-) Mixer gerührt. Messung der Schaumhöhe.	Test für Schaumverhalten unter hohen Scherkräften (historischer Standard).
11 ASTM D 3601	Bottle-Test Schaumerzeugung durch Schütteln in einem geschlossenen Gefäß. Messung der Schaumhöhe.	Test für Schaumverhalten unter niedrigen Scherkräften (historischer Standard).
12 Inhouse BASF	Entlüfter-Test Eine Rohbaumwoll-Garnwickelspule wird in einen Messzylinder mit der Tensidlösung gegeben. Die Luft in der Garnwickelspule wird daraufhin verdrängt und die Höhe des Flüssigkeitsniveaus nimmt dadurch mit der Zeit ab.	Test für die Wirksamkeit von Entlüftern: Je schneller und je stärker am Ende die Höhe des Flüssigkeitsniveaus abnimmt, um so effizienter und effektiver ist der Entlüfter.
13 DIN EN 1568	Prüfung von Feuerlöschschäumen Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Teil 1 - Mittelschaum für nicht-polare Flüssigkeiten Teil 2 - Leichtschaum für nicht-polare Flüssigkeiten Teil 3 - Schwerschaum für nicht-polare Flüssigkeiten Teil 4 - Schwerschaum für polare Flüssigkeiten	In der Norm werden die an die Schaummittel gestellten Anforderungen und die Prüfmethode beschrieben.
14 Inhouse Kao	Bubbling Method Einleiten von Luft in eine Tensidlösung, Schaum läuft über in einen kalibrierten Zylinder; Messung von Schaumdichte, Schaumhöhe, Anschäumgeschwindigkeit und Drainage.	Gut geeignet für Rinse-off-Produkte (Personal Care), insbesondere zur Beurteilung von Schaumqualität und Schaumstabilität. Gute Reproduzierbarkeit.
15 Inhouse Kao	Reversed Stirring Method Rühren der Lösung in 2 Richtungen. Messung nach 30 Sekunden, 1, 3 und 5 Minuten	Gute Methode für Rinse-off-Produkte (Personal Care) Messung von Schaumhöhe und Schaumstabilität. Als Schmutzart kann Sebum verwendet werden. Die Positionierung des Rührers in der Lösung ist kritisch.
16 Inhouse Kao	Zirkulationstest Umpumpen bis definierte Schaumhöhe erreicht, Messung nach 15 Minuten.	Gute Methode für schwach schäumende Systeme, I & I -Reiniger, Metallbearbeitung. Zu achten ist auf eine penible Reinigung aller Geräteteile.
17 Inhouse Kao	Schütteltest 30 Sekunden Schütteln, Volumenmessung.	Schneller Screening-Test für Schäumvermögen und Schaumstabilität. Art der Schaumerzeugung schwer standardisierbar.

Prüfmethode	Kurzbeschreibung	Bemerkungen
18 IKW-Empfehlung	Plate-Test Erzeugung von Schaum durch Reiben und Bürsten von harten Oberflächen in der Reinigungslösung und Bestimmung des Schaumverhaltens unter Schmutzbelastung [26].	Gut geeignet für Handgeschirrspülmittel. Bestimmung der Schaumstabilität gegenüber Fett.
19 Inhouse Evonik	Modifizierter Zirkulationstest (auch als „Jean MaireTest“ oder „Renault Small Station Test“ bezeichnet) Modifizierter Zirkulationstest (3), lange Umpumpzeiten bis zu 16 Std., nach definierten Zeiten Messung von Schaumhöhe und Ölabscheidungen. Variation der Wasserhärte.	Schaumverhalten von Kühlschmierstoffen.
20 Inhouse Synthomer	Aufschäumtest mit Prüfung der Schaumstabilität Schaumerzeugung mit Küchenmixer oder Planetenrührmaschine. Bestimmung des Schaumlitergewichts und Beurteilung der Schaumstabilität. Einstufung nach festgelegten Kriterien.	Praxisnahe und schnelle Methode.
21 Inhouse MÜNZING	Schütteltest für Entschäumerleistung in Lacken und Farben Schaumerzeugung mit „Red-Devil-Mixer“. Messung der Dichte und Berechnung des Luftgehalts.	Gut geeignet sowohl für niedrige als auch hoch viskose System. Mixer gewährleistet intensive, reproduzierbare Mischleistung (Lufteintrag).
22 Inhouse MÜNZING	Dissolver Test Schaumerzeugung durch intensives Mischen im Messzylinder mittels Rührscheibe (Dissolverscheibe, Zahnscheibe). Messung von Schaumvolumen und Schaumstabilität.	Gut geeignet insbesondere für Beschichtungsstoffe mit niedriger Viskosität, bei denen eingetragener Schaum sofort aufschwimmt.
23 Inhouse MÜNZING	Film-Entschäumung Applizierung des Lacksystems mit einer groben Schaumstoffwalze auf eine Kunststofffläche. Dabei wird Luft in den Beschichtungsfilm eingetragen. Visuelle Beurteilung des Makroschaums im nassen Zustand und nach dem Trocknen des verbleibenden Mikroschaums.	Bestimmung der Entschäumung/Entlüftung eines applizierten Lackfilms.
24 Inhouse BASF	Bestimmung des Schaumwerts im Papierstoff Rühren einer Suspension aus Holzstoff und Additiven in einer Schaumrinne. Messung der mit Schaum bedeckten Fläche.	Testen von Entschäumer/Entlüfter-Systemen.
25 Inhouse BASF	Bestimmung des Luftgehalts im Papierstoff Umpumpen und Rühren (Propellerrührer) einer Suspension aus Holzstoff und Additiven in einer Zirkulationsapparatur. Nach Erreichen eines vorgegebenen Luftgehalts wird die Schaumerzeugung eingestellt und die zeitabhängige Abnahme des Luftgehalts gemessen.	Testen von Entschäumer/Entlüfter-Systemen.
26 Inhouse BASF	Bestimmung des Luftgehalts im Papierstoff Schwächung des Ultraschalls durch eingeschlossene Luft	Testen von Entschäumer/Entlüfter-Systemen in der Papierindustrie. Gerät: Sonica Air Content Analyzer (Savcor Group Ltd Oy, Finnland).

Prüfmethode	Kurzbeschreibung	Bemerkungen
27 Inhouse BASF	Bestimmung des Schaumvolumens durch Messung des Kompressionsdruckes	Testen von Entschäumer/Entlüfter-Systemen in der Papierindustrie. Nachweis von eingeschlossener Luft.
28 Inhouse BASF	Bestimmung der eingeschlossenen Luft durch Dichtemessung mit Pyknometer	Testen von Entschäumer/Entlüfter-Systemen.
29 Inhouse BASF	Flotationszelle Direkte Simulation des Flotationsprozesses. Messung der Wirksamkeit von Additiven über Prozessparameter und Ausbeute.	Testen von Flotationshilfsmitteln (Schäumer, Sammler).
30 Inhouse Zschimmer & Schwarz	Entschäumertest Durch die Messlösung wird mittels Einleitrohr und Glasfritte ein konstanter Luftstrom geleitet. Das entsprechende Schaumvolumen wird in Abhängigkeit der Zeit registriert.	Einfache Methode zur Prüfung von Entschäumern und schwach schäumenden Tensiden.
31 Inhouse Zschimmer & Schwarz	Zirkulationstest Die Prüflösung wird kontinuierlich umgepumpt und durch eine Düse versprüht.	Praxisnahe Methode für schwach schäumende Tenside.

Weitere Schaumprüfmethode:

32 ASTM D 1173	Standard test method for foaming properties of surface-active agents ("Ross-Miles Method")
33 ASTM D 4009	Standard guide for foam stability of hand dishwashing detergents
34 ISO 9120	Bestimmung des Luftabscheidevermögens von Dampfturbinen- und anderen Ölen – Impinger-Verfahren
35 ASTM D 1881	Standard test method for foaming tendencies of engine coolants in glassware
36 ASTM D 4921	Standard test method for foaming tendencies of engine coolants at room temperature
37 EN 12704	Klebstoffe, Papier, Verpackung und Hygieneprodukte - Bestimmung der Schaumbildung von wässrigen Klebstoffen
38 EN ISO 9665	Klebstoffe - Tierleime - Verfahren für Probenahme und Prüfung

Kontaktadressen für die genannten Inhouse-Methoden:

BASF: kati.schmidt@basf.com oder global.info@basf.com

Clariant: dennis.miller@clariant.com

Ecogreen Oleochemicals: schroeter@dhw-ecogreenoleo.de

Evonik: joachim.venzmer@evonik.com

Kao: michael.stapels@kaochemicals.de

MÜNZING: p.bissinger@munzing.com

Sasol: renke.rommerskirchen@de.sasol.com

Synthomer: sandra.wagner@synthomer.com

Zschimmer & Schwarz: dr.w.brennich@zschimmer-schwarz.com

7. Literatur

Übersichtsarbeiten

J. J. Bikermann, "Foams", Springer, 1973

X. Domingo, L. Fiquet, H. Meijer, Tenside Surf. Det., 29, 16 (1992)

P. R. Garrett (ed.), "Defoaming" (Surfactant Science Series, Vol. 45), Marcel Dekker, 1993

D. Weaire, S. Hutzler, "The Physics of Foams", Oxford University Press, 1999

K. L. Mittal, P. Kumar (eds.), "Emulsions, Foams, and Thin Films", Dekker, 2000

R. J. Pugh, Adv. Coll. Interf. Sci., 64, 67 (1996)

M. J. Rosen and J. T. Kunjappu, "Surfactants and Interfacial Phenomena", Wiley, 4th ed., 2012; Ch. 7

J. Tropsch, F. Bauer, SOFW Journal 139, 61 (4-2013)

Im Text zitierte Literatur

1. M. H. Pahl, D. Franke, Chem. Ing. Techn., 67, 300 (1995)
2. E. D. Manev, S. V. Sazdanova, A. A. Rao, D. T. Wasan, J. Disp. Science and Technology, 3, 435 (1982)
3. C. Stubenrauch, Tenside Surf. Det., 38, 350 (2001)
4. R. J. Pugh, Adv. Coll. Interf. Sci. 114, 239 (2005)
5. A. Prins, Chem. Ing. Tech., 64, 73 (1992)

6. T. Engels, W. v. Rybinski, P. Schmiedel, Progr. Colloid Polym. Sci., 111, 117 (1998)
7. I. D. Morrison, Coll. Surf. A, 118, 257 (1996)
8. S. Ross, G. Nishioka, Chemistry and Industry, p. 47 (Jan. 1981)
9. I. C. Callaghan, in P. R. Garrett (ed), "Defoaming" (Surfactant Science Series, Vol. 45), Marcel Dekker, (1993); p. 119 ff
10. R. H. Ottewill, D. L. Segal, R. C. Watkins, Chemistry and Industry, p. 57 (Jan. 1981)
11. M. J. Schick, I. R. Schmolka, in M. J. Schick (ed) "Nonionic Surfactants" (Surfactant Science Series Vol. 23), Marcel Dekker (1987); Ch. 14
12. R. Chaisalee, S. Soontravanich, N. Yanumet, J. F. Scamehorn, J. Surf. Det., 6, 345 (2003)
13. B. Jakobs, B. Breitzke, M. Stolz, R. Verzellino, SOFW Journal, 131, 63 (6-2005)
14. N. Denkov, K. G. Marinova, S. S. Tcholakova, Adv. Coll. Interf. Sci., 206, 57 (2014)
15. S. Ross, Coll. Surf. A, 118, 187 (1996)
16. R. Brummer, "Rheology Essentials of Cosmetic and Food Emulsions", Springer-Verlag, 2006; p. 169

8. Glossar

17. Melliand Textilbericht, 76/3, 165 (1995) und 77/3, 153 (1996)
18. J. P. Byers, Manuf. Eng. Mater. Processes, 41, 191 (1994)
19. a) [www.http://www.sita-messtechnik.de](http://www.sita-messtechnik.de)
b) S. Hokamp, T. Gassenmeier, COSSMA (1-2/ 2014); www.cossmma.com
20. a) www.kruss.de
b) C. Bilke-Krause, T. Schörck, T. Winkler, Krüss Application Report AR267d (2010)
21. www.teclis-instruments.com
22. J. Boos, W. Drenckhan, C. Stubenrauch, J. Surf. Det., 16, 1 (2013)
23. R. M. Anstett, E. J. Schuck, J. Amer. Oil Chem. Soc., 43, 576 (1966)
24. A. Schrem, D. Miller, W. Skrypzak, 6th World Surfactant Congress, Berlin (2004)
25. a) D. Miller, T. Henning, SOFW Journal, 130, 24 (1/2-2004)
b) T. Gassenmeier, P. Busch, H. Hensen, Henkel-Referate, 35, 84 (1999)
26. Ch. Nitsch, G. Hüttmann, SOFW-Journal, 128, 23 (5-2002)

Die nachstehenden Begriffe wurden mit freundlicher Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e.V. weitgehend aus DIN EN ISO 862, Oktober 1995, entnommen.

Anschäumgeschwindigkeit

Quantitatives Maß für das Anschäumvermögen, z. B. Zunahme des Schaumvolumens pro Zeiteinheit.

Anschäumvermögen

Die Fähigkeit, Schaum in kurzer Zeit zu erzeugen.

Entlüfter

Substanz, die Einschluss von Luft (Mikroschaum) verhindert.

Entschäumer

Substanz, die Schaum zerstört oder die Schaumbeständigkeit beträchtlich vermindert. Schauminhibitoren, die die Entstehung von Schaum verhindern, werden oft auch Entschäumer genannt.

Grenzflächenaktivität/ Oberflächenaktivität

Wirkung einer Substanz, die die physikalischen (mechanischen, elektrischen, optischen usw.) Eigenschaften einer Oberfläche oder einer Grenzfläche verändert und ihre Oberflächenspannung oder Grenzflächenspannung verringert.

Grenzflächenaktive Verbindung

Chemische Verbindung, die Grenzflächenaktivität besitzt, die, gelöst in einer Flüssigkeit, vorzugsweise in Wasser, die Oberflächenspannung oder die Grenzflächenspannung durch bevorzugte Adsorption an der Grenzfläche flüssig-gasförmig oder an anderen Grenzflächen verringert.

Grenzflächenspannung

Spannung an den Grenzflächen zwischen zwei Phasen (siehe Oberflächenspannung).

Oberflächenspannung

Spannung, die in der Oberfläche einer Phase auftritt und gegen das Innere der Phase gerichtet ist, hervorgerufen durch intermolekulare Anziehung zwischen den Molekülen an der Oberfläche und jenen, die unterhalb der Oberfläche liegen.

Die Oberflächenspannung wird in mN/m ausgedrückt. Der Begriff „Oberflächenspannung“ bezeichnet den speziellen Fall einer Grenzflächenspannung, d.h. Kräfte an der Grenzfläche zwischen flüssiger und gasförmiger Phase.

Schaum

Gesamtheit der Gaszellen, die durch dünne Flüssigkeitsfilme getrennt sind und durch Aneinanderreihen von Blasen gebildet werden, wobei eine Dispersion entsteht, in der ein verhältnismäßig großes Gasvolumen in einer Flüssigkeit dispergiert ist.

Schaumbildungsvermögen

Siehe Schäumvermögen.

Schäummittel, Schäumer

Substanz, die, einer Flüssigkeit zugesetzt, die Fähigkeit verleiht, Schaum zu bilden.

Schäumvermögen

Fähigkeit eines Produktes, Schaum zu bilden.

Schaumbooster

Produkt, welches das Schäumvermögen erhöht.

Schaumdichte

Quotient aus Schaumgewicht durch Schaumvolumen [g/Liter].

Schaumstabilisator

Produkt, das die Stabilität eines Schaums erhöht.

Spreitvermögen

Eigenschaft einer Flüssigkeit, besonders einer Lösung von grenzflächenaktiven Verbindungen, die einen Tropfen dieser Flüssigkeit befähigt, spontan eine andere flüssige oder feste Oberfläche zu bedecken.

Trübungspunkt

Temperatur, oberhalb derer wässrige Lösungen nichtionischer grenzflächenaktiver Verbindungen durch Trennung in zwei flüssige Phasen heterogen werden.

Verschäumungszahl

Verhältnis des Schaumvolumens zum Volumen der Schaummittellösung, aus der der Schaum erzeugt wurde.

Unser Dank gilt allen
Beteiligten, die mit ihren
Beiträgen und Kommentaren
zum Entstehen dieser
Broschüre beigetragen haben.
Besonders danken
möchten wir:

Martin Brendel,
ehemals Synthomer, Frankfurt,

Dr. Michael Brock, Sasol, Marl,

Brigitte Finger, Evonik, Essen,

Dr. Christoph Hamers, BASF AG, Ludwigshafen,

Dr. Eberhard Knofe,
DHW Deutsche Hydrierwerke Rodleben GmbH,

Prof. Dr. Heinz Rehage, Universität Dortmund,

Dr. Alfred Ruland,
ehemals BASF, Ludwigshafen,

Dr. Heribert Schmitz,
ehemals MÜNZING, Heilbronn,

Sandra-C. Schnapper,
Verband TEGEWA e.V., Frankfurt,

Dr. Hans Schulze,
LANXESS Deutschland GmbH, Leverkusen,

Prof. Dr. Ing. Lothar Schulze,
SITA Messtechnik, Dresden,

Ute Timpe, v-com, Ingelheim,

Dr. Claudia Wood, BASF, Ludwigshafen.