

MICHAŁ DYŁĄG, JERZY ROSIŃSKI, JERZY KAMIEŃSKI\*

## NEUARTIGE DEFINITION DER SCHAUMZERSTÖRUNGSEFFIZIENZ

---

## NEW DEFINITION OF THE FOAM DESTRUCTION EFFECTIVENESS

### Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit bestand in der Erarbeitung einer neuartigen Methode zur Beurteilung der Schaumzerstörungseffizienz, die es erlaubt einheitliche Extremwerte für eine maximale Schaumzerstörungseffizienz (d.h. kein Restgasanteil) und die totale unwirksame Schaumzerstörung (gleicher Gasanteil im Primär- und im Sekundärschaum aufweisen) zu definieren. Am Beispiel der Schaumzerstörung beim Durchpressen durch poröse Strukturen wurden gemessene und berechnete Effizienzwerte verglichen. Sie stimmen sehr gut überein. Die Einführung des Schaumlamellenbruch-Parameters in die semi-empirische Form der Schaumzerstörungseffizienz der Schaumzerstörungseffizienzgleichung, erlaubt es eine effektive Rechenmodellgleichung aufzustellen.

*Schlüsselworte: Primär- und Sekundärschaum, Schaumzerstörungseffizienz, Entgasungsanteil, Entgasungseffizienz, Schaumlamellenbruch-Parameter*

### Abstract

In the article the new method to define the effectiveness of the destruction foams proposal was introduced. The proposed formula is free from the faults and the imperfections so far taken equations and is applying for the all foam destructors types and their structural modification. New formula applying will permit for the comparison, the selection and the optimization of designed devices. The experimental researches results for flow foams through porous layers with known height and structure were reported.

*Keywords: primary and secondary foam, foam destruction effectiveness, part of the freed gas phase, degassing effectiveness, parameter of lamellae cracking*

---

\* Prof. dr hab. inż. Michał Dyląg, dr inż. Jerzy Rosiński, prof. dr hab. inż. Jerzy Kamieński,  
Instytut Aparatury Przemysłowej i Energetyki, Politechnika Krakowska.

## 1. Einleitung

Eine Dispersion von Gas in Flüssigkeit bezeichnet man als Schaum, wenn der Gasanteil vorherrscht. Je nachdem, wo und unter welchen Umständen ein Schaum auftritt, ist er gewünscht oder ungewünscht. Zum Feuerlöschen, in der Kosmetik und in der Lebensmitteltechnik sind besonders stabile Schäume gefordert. Jedoch einige, durch Schäume verursachte Prozessstörungen, z.B. in Klärwerken, in biotechnologischen Anlagen oder nach einer Flotationsstufe, machen eine Schaumzerstörung notwendig [1, 2].

Es existiert eine Fülle chemischer, thermischer und mechanischer Verfahren, deren wesentliche Wirkprinzipien und Unterschiede der einzelnen Methoden in zahlreichen Publikationen zusammengestellt sind [3].

Die Vielfalt der Schaumzerstörer, die prozesstechnisch eingesetzt wird, weist auf den Bedarf und gleichzeitig auf die unzureichende Beschreibungsmöglichkeit der angewandten Schaumzerstörer hin [4-6].

## 2. Stand des Wissens und Zielsetzung

Als Maß der Schaumzerstörungseffizienz hat sich bis heute noch keine Definition als allgemein anerkannte Größe durchgesetzt. Wie aus dem unten angegebenen Literaturüberblick hervorgeht, werden unterschiedliche Definitionen der Schaumzerstörungseffizienz zur Charakterisierung und letztlich Beschreibung der Wirkmechanismen verwendet. Außerdem beruht die Entwicklung immer wieder neuer Geräte oft auf Erfahrungen mit individuellen Stoffsystemen, die nicht auf andere Stoffsysteme übertragen werden kann.

Von den bekanntesten Definitionen der Schaumzerstörungseffizienz sind einige der wichtigsten und in der Praxis auftretenden vorgestellt.

Mit der Schaumzerstörung mit einem Turbinenrührer haben sich Viestors und Kristapsons [7] beschäftigt. Zum Vergleich der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Geometrien wurde die nachfolgend definierte Effizienz der Schaumzerstörung benutzt

$$E = 100 \cdot \left( 1 - \frac{V_R}{V_S} \right) = 100 \cdot \frac{V_0}{V_S} \quad (1)$$

mit:

- $E$  – Effizienz der Schaumzerstörung in %,
- $V_S$  – ursprüngliches Schaumvolumen (Primärschaumvolumen),
- $V_R$  – Restschaumvolumen (Sekundärschaumvolumen),
- $V_0$  – ursprüngliches Volumen des zerstören Schaumes.

Die aus (Gl. 1) berechnete Effizienz variierte nur von ca. 76 bis 82%.

Mit der Schaumzerstörung in Zyklonen beschäftigte sich Wyczałkowski [8], der eine Mindesteintrittsgeschwindigkeit für den Primärschaum angegebenen hat. Der Wirkungsgrad  $\eta$  ist zwar nicht explizit definiert, entspricht aber wahrscheinlich der in der Arbeit [8] definierten Effizienz mit  $\eta = E/100$ . Der Wirkungsgrad  $\eta$  ist auf Grund der (Gl. 2)

$$\eta = 0,9637770 + 0,00199973 \cdot w - 0,0054399 \cdot \rho - 0,0000024 \cdot V_{sl} \quad (2)$$

mit:

- $u_s$  – minimale Schaumeintrittsgeschwindigkeit,
- $\rho_s$  – Schaumdichte,
- $V_{sL}$  – Sekundärluftmenge,

über den ganzen untersuchten Parameter-Bereich praktisch konstant mit einem Wert 0,96.

Untersuchungen zur Schaumzerstörung mit einer schnell rotierenden Scheibe von Rubin und Golt [9] haben es erlaubt, die Effizienz mit dem nachfolgend definierten „Kondensationsfaktor“ anzugeben

$$C_F = 100 \cdot \frac{\dot{V}_R^*}{\dot{V}_\Gamma^*} \quad (3)$$

mit

- $C_F$  – Kondensationsfaktor,
- $\dot{V}_R^*$  – Restschaumvolumenstrom am Schaumzerstörerabfluss,
- $\dot{V}_\Gamma^*$  – totaler Flüssigkeitsvolumenstrom am Schaumzerstörerabfluss.

Eine gute Schaumzerstörung ergibt nach der Definition nach Gleichung (3) kleine Kondensationsfaktoren  $C_F$ . Unterhalb der kritischen Scheibendrehzahl nimmt der Kondensationsfaktor  $C_F$  mit zunehmender Drehzahl infolge der verbesserten Wirkung der Teflanscheibe ab, und wird nach Erreichen der kritischen Drehzahl  $n_k$  konstant. Aus den Messdaten wurde für den Kondensationsfaktor im Drehzahlbereich unterhalb der kritischen Drehzahl und bei einer Tensidkonzentration von 100 ppm [9] folgende empirische Gleichung hergeleitet

$$\log C_F = 37,97 + 8,8 \cdot \log \left( \frac{\dot{V}_S^*}{r^{1,25} \cdot n^3} \right) \quad (4)$$

mit:

- $C_F$  – Kondensationsfaktor,
- $\dot{V}_S^*$  – Schaumvolumenstrom,
- $r$  – Abstand Schaumaufgabe zu Scheibenzentrum,
- $n$  – Scheibendrehzahl.

Der Variationsbereich des Kondensationsfaktors  $C_F$  im Bereich der Versuchsparameter nach (Gl. 4) liegt von 60% bei kleiner Drehzahl bis zu Werten zwischen 6 um 1,5% bei der kritischen Drehzahl.

Alle bekannten und verwendeten Definitionen haben jedoch allesamt den Nachteil, dass sie nicht einheitliche Extremwerte für eine maximale Schaumzerstörungseffizienz (d.h. kein Restgasanteil) und die total unwirksame Schaumzerstörung (gleicher Gasanteil im Primär- und Sekundärschaum) aufweisen. Vielmehr sind die extremen Effizienzwerte jeweils vom Flüssigkeitsanteil im Primärschaum abhängig.

Zusammenfassend sollte eine Definition erarbeitet werden, die die vorgestellten Mängel beseitigt und damit einen Vergleich verschiedener Konstruktionslösungen der zerstörer ermöglicht.

### 3. Definition der Schaumzerstörungseffizienz und Diskussion der Definitionsformel

Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Definition der Schaumzerstörungseffizienz basiert nur auf der Abnahme des Gasanteils vom Primärschaum zum Sekundärschaum und leidet durch die Normierung auf den Primärschaumgasanteil nicht an den oben erwähnten Nachteilen.

Im Bezug auf den allgemein bekannten Begriff der Effizienz, z. B. bei Absorption oder Entstaubung usw., wird die Schaumzerstörungseffizienz  $\eta_d$  als Verhältnis von Volumen des freigesetzten Gases zu einem Anfangsvolumen in der gesamten Schaumstruktur wie folgt definiert

$$\eta_d = \frac{V_{g,u}}{V_{g,0}} \quad (5)$$

Da das Volumen der freigesetzten Gasphase  $V_{g,u}$  technisch schwer messbar ist, wird es einfacher es als Differenz des Anfangsanteiles und Endanteiles des Gases in der Schaumstruktur vorzustellen

$$\eta_d = \frac{V_{g,0} - V_{g,k}}{V_{g,0}} = 1 - \frac{V_{g,k}}{V_{g,0}} \quad (6)$$

Messtechnische Aspekte berücksichtigend wird anstatt Gasvolumen oder Volumenströme ein Volumenanteil der Gasphase in der (Gl. 6) eingeführt. Durch das Dividieren des Nenners und Zählers im Bruchausdruck (6) durch das gesamte Anfangsvolumen des Schaumes, d.h. durch die Summe des Gas- und Flüssigkeitsvolumens, erhält man

$$\eta_d = 1 - \frac{\frac{V_{g,k}}{V_{g,0} + V_{c,0}}}{\frac{V_{g,0}}{V_{g,0} + V_{c,0}}} = 1 - \frac{\frac{V_{g,k}}{V_{g,0} + V_{c,0}}}{\epsilon_0} \quad (7)$$

Der des umgeformten im Zähler auftretenden Verhältnisses lässt sich einschätzen durch die Einführung des Endanteiles des Gases in der gesamten Schaumstruktur.

Nach entsprechender Umformung der (Gl. 5) nimmt diese folgende Form an

$$\eta_d = 1 - \frac{\epsilon_k}{\epsilon_0} \quad (8)$$

Nach Einführung des Flüssigkeitsanteils an Stelle des Gasanteils bekommt man die endgültige Formel für der Schaumzerstörungseffizienzdefinition  $\eta_d$

$$\eta_d = 1 - \frac{1 - \varphi_k}{1 - \varphi_0} = \frac{(1 - \varphi_0) - (1 - \varphi_k)}{1 - \varphi_0} = \frac{\varphi_k - \varphi_0}{1 - \varphi_0} \quad (9)$$

Es ist jedoch zu erwähnen, dass während der Anfangsphase der Schaumzerstörung, d.h. wenn es vor allem mit dem Effekt der so genannten Selbstschaumzerstörung zu rechnen ist

– erhält man negative Werte des Ausdruckes (9). Diese Erscheinung ist auf die verwendete Umformung und Einführung in den Zähler des Definitionsbruches anderen Größe, die einfacher messbar ist.

Bei Validierungsprozeduren von Rechengleichungen und gemessenen Werten hat sich das Auftreten des Phänomens bestätigt, aber ausschließlich für  $\eta_d < 0,01$ , was praktisch keine Akzeptanz für gegebenen Schaumzerstörer in die technische Anwendung bedeutet.

Dabei gelten die beiden für alle Schäume gleichen, extremen Werte

$$\begin{aligned} \eta_d(\varphi_R = 0) &= 0 \quad \text{keine Entgasung} \\ \eta_d(\varphi_R = 1) &= 1 \quad \text{vollständige Entgasung} \end{aligned} \quad (10)$$

Wie aus der Definitionsgleichung (9) ersichtlich ist, hängt die Entgasungseffizienz linear vom gemessenen und dann ausgewerteten Flüssigkeitsanteil in Sekundärschaum ab.

In Bild 1 sind übersichtshalber die Entgasungseffizienz für die beiden in dieser Arbeit verwendeten Primärschaumqualitäten in Funktion des Sekundärschaumflüssigkeitsanteils aufgetragen.

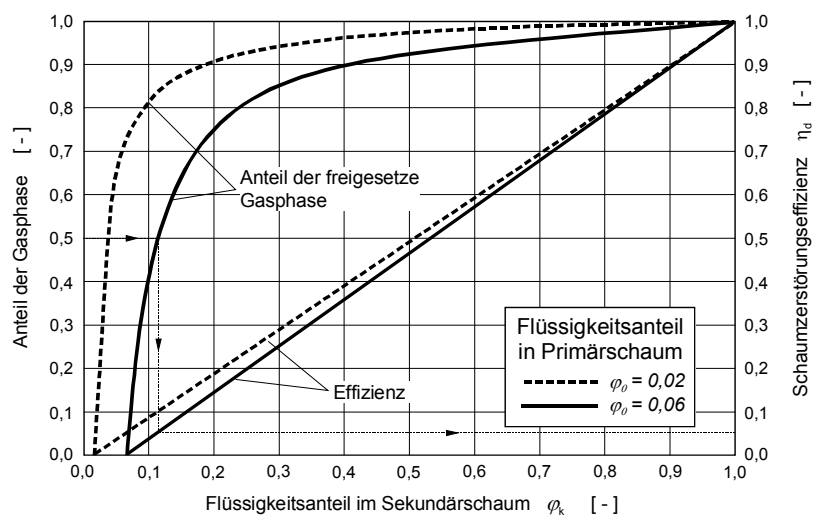


Bild 1. Anteil der abgetrennten zur totalen Gas im Primärschaum und Schaumzerstörungseffizienz in Funktion des Restschaumflüssigkeitsanteils für Primärschaum mit 2 und 6% Flüssigkeitsanteil

Fig. 1. The participation of the part of the gauze bevel separated from its total contents in primary foam and the foam destruction effectiveness vs. the participation of the liquid phase in primary foam about 2 and 6% participation of the liquid phase

Aus dem Blickwinkel des Anteils des bei der Schaumzerstörung abgetrennten zu dem im Primärschaum enthaltenen Gas ist die Entgasungseffizienz nach (Gl. 9) jedoch ein sehr strenges Maß, was in Bild 1 die links aufgetragene zweite unabhängige Achse veranschaulicht. Wird zum Beispiel die Hälfte der Primärschaumluft bei der Schaumzerstörung abgetrennt, ergibt sich für den feinen Primärschaum mit  $\varphi = 0,06$  nur

eine Entgasungseffizienz  $\eta_d = 0,05$  und für den groben Schaum mit  $\phi = 0,02$  eine solche von 0,020.

Umgekehrt müssen zur Erreichung einer Entgasungseffizienz von 0,1 bei feinem Schaum 65% und beim groben Schaum sogar 85% des Primärschaumgases bei der Schaumzerstörung abgetrennt werden können.

#### 4. Modellierung des Schaumzerstörungsvorganges

Der grundlegende Vorgang bei der Schaumzerstörung ist das Zerreißen von Flüssigkeitslamellen, so dass das in den Schaumblasen eingeschlossene Gas entweichen und von der Schaumflüssigkeit getrennt werden kann. Aus der Beurteilung des Wissensstandes geht hervor, dass jedoch keine Modelle existieren, die das Zerreißen der Flüssigkeitslamellen mechanisch im Detail behandeln. Viel mehr beschränken sich die vorhandenen Modelle auf globale Betriebsparameter, die für gewisse Schaumzerstörer mittels Korrelationsgleichungen miteinander verknüpft sind.

Ein allgemeines Modell zur Dynamik von Flüssigkeit/Gas-Grenzflächen wird z.B. in [10] vorgestellt. Dieses Modell zeigt, dass für Newtonsche, isotrope Flüssigkeiten (d.h. die Deformation hängt linear von der Beanspruchung ab) die Spannungsgrenzflächenbedingungen durch die Grenz- respektive Oberflächenspannung und zwei Oberflächenviskositäten beschrieben werden kann. Mit anderen Worten hängt die Deformation von drei additiven Termen ab: der Oberflächenspannung, Oberflächendilatation und Oberflächenviskosität. Andererseits zeigen einfachere Modelle zur Beschreibung des Grenzflächenverhaltens wie Gibbs-Elastizität [2] nur die Abhängigkeit von der Oberflächenspannung.

Aufgrund aller Gegebenheiten, die Änderungen des Oberflächenspannungswertes mit expandierende Lamellen (z.B. Überhöhung der Gleichgewichtsoberflächen, was zum Filmbruch führt) und zusätzlich dem Fehlen der richtigen Stoffdaten der mechanisch beanspruchten Grenzflächen, wird deshalb das Problem des Schaumlamellebruchs nur auf die Oberflächenspannung der Tensidlösung abgestützt.

Das nachfolgende Modell hat deshalb einen semiempirischen Charakter und muss die fehlenden Stoffdaten der Grenzfläche implizit über eine entsprechende mathematische Verknüpfung der dynamischen Oberflächenspannung berücksichtigen.

Weil selbst die dynamische Oberflächenspannung nur lückenhaft und wahrscheinlich wenig zuverlässig bekannt ist, werden sie aus Literaturdaten und eigenen Messungen interpoliert.

Das Resultat dieser Interpolation und damit die für die nachfolgende Überlegungen benutzte dynamische Oberflächenspannung des Tensidsystems Wasser/Mersolat H95 ist in Bild 2 dargestellt.

Die beiden erwähnten Teilvorgänge der mechanischen Schaumzerstörung werden den obigen Ausführungen so berücksichtigt, dass das mikroskopische Verhalten über dynamische Oberflächenspannung eine nominelle Beanspruchung der Schäume ergibt, zugleich jedoch die Durchströmung des Schaumes durch die Poren Druck und Geschwindigkeit des Strömungsfelds ändert.

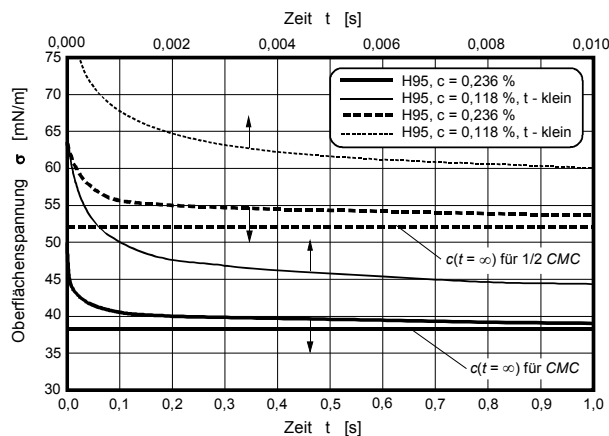


Bild 2. Dynamische Oberflächenspannung der Tensidlösung (interpoliert aus den eigenen Messungen [10] und Literaturdaten [1, 5])

Fig. 2. Dynamic surface tension for the Mersolat H95/water system

Die neusten Untersuchungen [11] zeigen generell, dass die transiente Oberflächenspannungserhöhung infolge einer raschen Streckung von Schaumlamellen eine Schlüsselgröße hinsichtlich der Modellierung der Schaumzerstörer darstellt.

#### 4.1. Semi-empirischer Ansatz

Da die Modellierung der Schaumzerstörungseffizienz auf dem Schaumlamellenbruch basieren soll, wird als Basis für den semi-empirischen Ansatz ein Maß für den Schaumlamellenbruch definiert:

$$\begin{aligned}
 \lambda = 1 & \quad \text{alle Schäumlamellen brechen,} \\
 & \quad \text{entspricht – vollständige Entgasung} \\
 0 \leq \lambda_{Br} < 1 & \quad \text{nur Anteil } \lambda_{Br} \text{ aller Schaumlamellen} \\
 & \quad \text{brechen, d.h. nur Teilentgasung}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Diese eingeführte Definition der Schaumlamellenbruch-Parameter  $\lambda_{Br}$  besagt, dass eine Schaumblase entweder aufgebrochen oder vollständig entgast wird, oder aber intakt bleibt und damit auch kein Gas entzogen werden kann. Die Erfahrung bei den Schaumzerstörungsuntersuchungen [11, 12] zeigt dagegen, dass der im Schaumzerstörer entstehende Sekundärschaum aus sehr kleinen Blasen besteht, was dem obigen Bild der entweder Ganz- oder Nichtentgasung nicht genau entspricht. Hinsichtlich der vorhandenen Grundlagen und Resultate hat sich dieser Ansatz trotzdem bewährt.

Der Schaumlamellenbruch-Parameter ist mit der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Schaumzerstörungseffizienz nach (Gl. 9) wie folgt verknüpft

$$\eta_d = \frac{\varphi \cdot \lambda_{Br}}{1 - \lambda_{Br} + \varphi \cdot \lambda_{Br}} \tag{12}$$

mit:

- $\eta_d$  – Schaumzerstörungseffizienz,
- $\varphi$  – Flüssigkeitsanteil im Primärschaum,
- $\lambda_{Br}$  – Maß für Schaumlamellenbruch.

Gemäß den Ausführungen in [12] (vgl. auch [11, 1]) wurde experimentell gezeigt, dass Schaumflüssigkeitslamellen bei Überschreiten einer gewissen Dehnungsrate, der einer dynamischen Oberflächenspannung  $\sigma_{Br}$  entspricht, zerreißen.

Als Basis für den semi-empirischen Ansatz hinsichtlich des mikroskopischen Verhaltens der Schaumlamelle beim Schaumzerstörungseingriff wurde deshalb folgender, konzentrationsabhängiger Ausdruck gewählt

$$\Sigma_n = \frac{\sigma(t, c) - \sigma_e(c)}{\sigma_{Br}(c) - \sigma_e(c)} \quad (13)$$

mit:

- $\Sigma_n$  – normierte, dynamische Oberflächenspannung,
- $t$  – Zeit,
- $c$  – Tensidkonzentration,
- $\sigma(t, c)$  – dynamische Oberflächenspannung,
- $\sigma_e(c)$  – Gleichgewichtsoberflächenspannung,
- $\sigma_{Br}(c)$  – Oberflächenspannung.

Dieser Ansatz ist dem oben definierten Maß für den Schaumlamellenbruch  $\lambda_{Br}$  nicht äquivalent, indem der Ausdruck nach Gleichung (13) für  $\sigma(t, c)$  mit  $\sigma_e(c) < \sigma(t, c) < \sigma_{Br}(c)$  Werte zwischen 0 und 1 ergibt, d.h. gemäß  $\lambda_{Br}$  eine Teilentgasung. Im strengen Sinne der Definition von  $\sigma_{Br}(c)$  kann ein Schaumlamellenbruch jedoch nur für  $\sigma(t, c) > \sigma_{Br}(c)$  erfolgen.

Entsprechend den Literaturangaben [2] soll über die dynamische Oberflächenspannung das gesamte Verhalten der Lamelle, d.h. auch der Einfluss nicht bekannter Stoffgrößen, abgefangen werden.

Aufgrund der Analyse der gemessenen Schaumzerstörungseffizienz bewährte sich dazu der folgende Ansatz als Verknüpfung zwischen  $\lambda_{Br}$  und dem Ausdruck (13)

$$\lambda_{Br} = a_1 + a_2 \cdot e^{\left[ \frac{\sigma(t, c) - \sigma_e(c)}{\sigma_{Br}(c) - \sigma_e(c)} \right]} \quad (14)$$

In diesem Ansatz ist die Oberflächenspannung  $\sigma_{Br}(c)$  beim Filmbruch allerdings für das hier verwendete Schaumsystem Mersolat H95/Wasser nicht bekannt und muss deshalb aufgrund der Messwerte für die beiden verwendeten Konzentrationen mit Regressionsanalyse bestimmt werden.

Es sei an dieser Stelle auch vermerkt, dass der hier vorgestellte semi-empirische Ansatz natürlich das Resultat von vielen Regressionsanalysen ist, und bleibt nicht der erste und erfolgreichste Ansatz zur Beschreibung der Schaumzerstörungseffizienz in Funktion der variierten Betriebsparameter.



## 4.2. Experimentelle Untersuchungen

Zur Verifikation der vorgestellten Überlegungen wurden experimentelle Untersuchungen zur Schaumzerstörung bei Durchströmung von porösen Schichten in einer Kolonne durchgeführt.

### 4.2.1. Versuchsaufbau

Die Versuchsanlage in Bild 3 besteht aus einer transparenten Kolonne 14. Der Gasstrom für die Schaumerzeugung wird aus dem Kompressor 1 und Ausgleichsbehälter 2 über einem Druckminderer 4 entnommen, feinststaub 3 und von Öl befreit und danach durch einen Luftsättiger geleitet, um eine definierte Luftfeuchtigkeit einzustellen. Das so behandelte Gas wird durch ein Gasvolumenstrommesssystem geleitet und gelangt in die Vorkammer der Kolonne, in der ein leichter Überdruck herrscht. Das Gasventil 8 besteht aus einer wechselbaren Sinterplatte mit einer mittleren Porenweite von 40–800  $\mu\text{m}$  oder einer Siebplatte mit Sieblöchern vom Durchmesser  $d = 0,7; 1; 2 \text{ mm}$ .

In der Kolonne wird ein Primärschaum mit einem Flüssigkeitsvolumenanteil  $\varphi = 0,01-0,1$  durch Dispergieren von Gas in einer Tensidlösung erzeugt und weiter durch eine poröse Sicht 15 aus Glaskugeln mit dem Durchmesser von 3; 4; 5 mm durchgepresst. Entlang des oberen Teils der Kolonne waren Druckmessgeber 13 angebaut, um die vertikale Druckverteilung messen zu können.

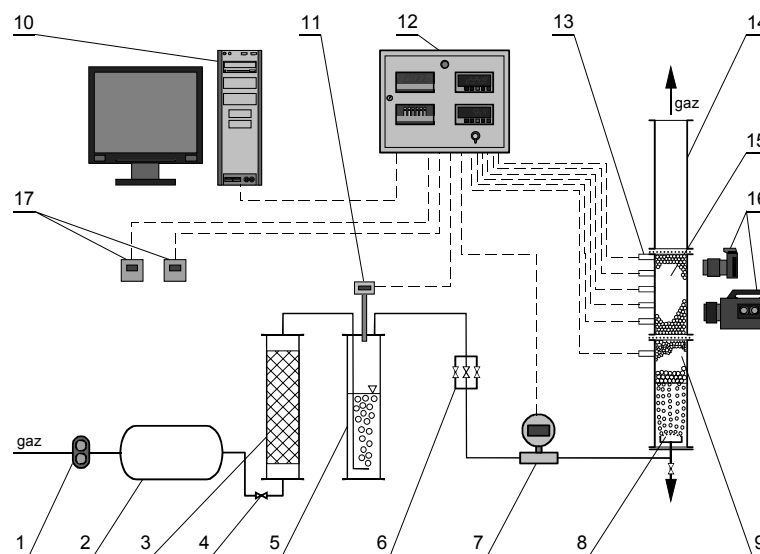


Bild 3. Versuchsanlagenschema

Fig. 3. Schematic diagram of the research stand

Die Schaumschicht wurde mit CCD Kamera kontinuierlich aufgenommen – das photographische Verfahren war sowohl bei Primär- als auch bei Sekundärschaumbildern

erfolgreich. Zusätzlich wird die Temperatur und Druck gemessen und als Signale an den PC zur weiteren Bearbeitung 10 geleitet.

#### 4.3. Diskussion der Untersuchungsergebnisse

Nachfolgend wird der Einfluss der Betriebsparameter auf die Schaumzerstörungseffizienz diskutiert. Es ist vorerst anzumerken, dass der Flüssigkeitsanteil des Primärschaumes und die hauptsächliche Variation des mittleren Schaumblasendurchmessers (neben derjenigen durch die Schaumkonzentration) nicht unabhängig voneinander erfolgen konnte, da für die feine und grobe Sinterplatte mit unterschiedlichen Flüssigkeitsanteilen gefahren werden musste. Dadurch ist auch eine Trennung der beiden Einflüsse auf die Schaumzerstörungseffizienz nicht a priori gegeben, d.h. der Einfluss des Schaumblasendurchmessers kann im Prinzip auch über die Variation des Flüssigkeitsanteils abgefangen werden.

Aufgrund der Messungen zeigt sich, dass besonders wichtig auf Endergebnis der Schaumzerstörung übt die Schaumqualität aus, die wird effektiv durch drei Betriebsparameter nämlich Tensidkonzentration  $c_T$ , den mittleren Schaumblasendurchmesser  $d_B$  und den Flüssigkeitsanteil  $\varphi$  im Primärschaum, bestimmt.

Mit steigender Tensidkonzentration  $c_T$  nimmt die Schaumzerstörungseffizienz ab. Dabei beeinflusst die Tensidkonzentration bei Verwendung der gleichen Sinterplatte in kleinen Masse den mittleren Schaumblasendurchmesser, ihr Haupteinfluss geht jedoch in den Basisausdruck des semi-empirischer Ansatzes nach (Gl. 13). Alle drei  $\sigma$  Werte in dieser Gleichung sind nämlich konzentrationsabhängig und insbesondere wurde in Literatur [12] gezeigt, dass die Oberflächenspannung  $\sigma_{Br}$  bei Filmbruch mit steigender Konzentration sinkt.

Mit größer werdendem Schaumblasendurchmesser nimmt die Schaumzerstörungseffizienz zu. Gemäß dem Stand des Wissens über Schaumstrukturen [1] haben die Schaumlamellen ein polyederförmige Gestalt. Bei großen Blasen sind auch die Flüssigkeitslamellen größer und müssen aufgrund der Schaumbewegung auch „parallel“ zur Fläche der Poren ausgerichtet sein. Dadurch wird der Porenangriff für große Lamellen effizienter und ergibt eine größere Lamellenstreckung. Somit geht der Schaumblasendurchmesser in die Zeitberechnung für die Bestimmung der dynamischen Oberflächenspannung ein. Andererseits beeinflusst der Schaumblasendurchmesser auch das Strömungsverhalten innerhalb der porösen Schicht d.h. indirekt auch Primär- und Sekundärschaumverhalten. Der Schaumblasendurchmesser geht darum auch ins makroskopische Verhalten bei Schaumzerstörungsmechanismen ein.

Mit größer werdendem Flüssigkeitsanteil  $\varphi$ , nimmt die Schaumzerstörungseffizienz ab. Wie die Schaumblasendurchmesser beeinflusst auch der Flüssigkeitsanteil beide Teilvorgänge bei der Schaumzerstörung, die Analyse der gemessenen Schaumzerstörungseffizienzen zeigt aber, dass der dominante Einfluss über das Anströmungsverhalten in die Effizienz eingeht.

#### 4.4. Aufstellung der Rechengleichungen

Resultierend aus der obigen Diskussion sowie der Analyse experimenteller Daten ergibt sich folgender semi-empirische Ansatz für  $\lambda_L$  zur Beschreibung der Schaumzerstörungseffizienz nach (Gl. 12) in Funktion der aus den Versuchsparametern abgeleiteten

Einfluss-Parameter für drei untersuchte poröse Schichten aus Glaskugeln  $\phi 1,5$  mm mit der Höhe 30, 40, 50 mm.

$$\lambda_L = C_1 \cdot \left\{ a_1 + a_2 \cdot \exp \left[ a_5^i \cdot \frac{c_{B,1}}{c_\varphi} \cdot \frac{\sigma(t,c) - \sigma_0(c)}{\sigma_m(t,c) - \sigma_0(c)} \right] \right\} \quad (15)$$

mit

$$\begin{aligned} c_1 &= 1 + a_3 \cdot \lambda_L^{a_4} \\ c_{m,1} &= 1 + a_5 \cdot d_B \\ c_\varphi &= 1 + a_8 \cdot \varphi^{a_9} \end{aligned} \quad (16)$$

und

$$t = \frac{a_{10}^i}{c_w + c_v + c_{p,2} + a_{17}} \quad (17)$$

Der Ansatz nach (Gl. 12) gilt für alle gemessenen Schaumzerstörungseffizienzen, d.h. sowohl für alle durchgeführten Variationen der Betriebsparameter sowie auch für alle drei Kugelschichten. In Ansatz erscheinen 12 allgemeine Regressionskonstanten  $a_j$  porenschichtabhängige Regressionskonstanten  $a_j$  sowie die zwei als allgemeine Regressionskonstanten behandelten Oberflächenspannungen  $\sigma_{Br}$  bei Filmbruch für die beiden verwendeten Tensidkonzentrationen.

#### 4.5. Regressionsanalyseresultate

Die Regressionsanalyse wurde mit einem allgemeinen nichtlinearen Regressionsprogramm durchgeführt.

In Tabelle 1 sind die Resultate der Regressionsanalyse mit dem Ansatz nach (Gl. 15) in Form der Werte der Regressionskonstanten zusammengestellt.

Tabelle 1

**Werte der Regressionskonstanten als Resultat der nichtlinear Regressionsanalyse zur Berechnung der Schaumzerstörungseffizienz**

| Regressionskonstanten |          |          |          |                      |           |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------------------|-----------|
| $a_1$                 | -0,93669 | $a_8$    | -3,13625 | $a_5$                | 1,00000   |
| $a_2$                 | 0,928419 | $a_9$    | 0,999721 | $a_{10}$             | 0,134909  |
| $a_3$                 | -5,21764 | $a_{13}$ | -4,12986 | $a_{11}$             | -0,013971 |
| $a_4$                 | 1,046159 | $a_{14}$ | 0,10008  | $a_{12}$             | 1,994618  |
| $a_6$                 | -0,00724 | $a_{16}$ | 0,73255  | $a_{15}$             | 11,32394  |
| $a_7$                 | 12,03159 | $a_{17}$ | -214354  |                      |           |
| $\sigma_L$ (CMC)      | 44,81502 |          |          | $\sigma_L$ (1/2 CMC) | 59,6701   |

Die Varianz dieser Regression beträgt  $1,996 \cdot 10^{-3}$ , was einem mittleren Fehler der berechneten Werte von 0,013 ergibt. Im Vergleich mit der kleinsten Schaumzerstörungseffizienz ist dieser mittlere Fehler relativ hoch.

In Bild 4 ist der Vergleich aller gemessen mit den berechneten Schaumzerstörungseffizienz graphisch dargestellt.

Durch die doppelt-logarithmische Darstellung ist der Anstieg der relativen Fehler für kleine  $\eta_d$ -Werte sehr gut erkennbar.

Anhand der Regressionskonstanten nach Tabelle 1 können auch entsprechende Tendenzen der Einflussparameter erkannt werden. Dies ist insofern interessant, als wie vorher erwähnt, aufgrund des empirischen Anteils des Regressionsansatz und der nicht immer klar trennbaren Einflüsse der Versuchsparameter die richtige Tendenz des Einflussparameters verloren werden kann.

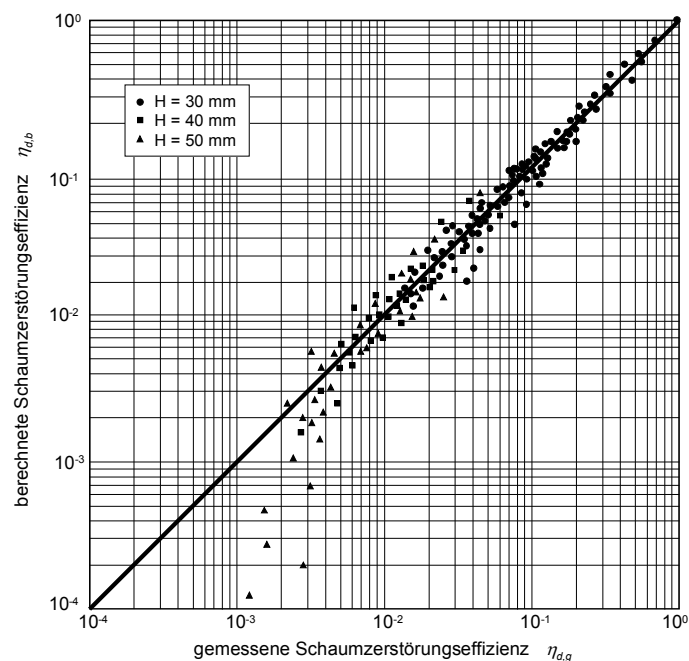


Bild 4. Vergleich der gemessenen mit den nach Gleichung (15) berechneten Schaumzerstörungseffizienz  $\eta_d$  für alle durchgeführten Messungen

Fig. 4. Comparison of the measured and calculated from the Equation (15) value of the foam destruction effectiveness

Der Ansatz degradiert in diesem Falle zu einer rein mathematischen Regression ohne physikalischen Hintergrund. Umgekehrt ist es sozusagen ein Qualitätsausweis für den Ansatz, wenn bei der Variation nur eines Einflussparameters dessen Tendenz durch die Regressionsergebnisse bestätigt wird. Insbesondere wird die Tendenz der Oberflächenspannung  $\sigma_{Br}$  bestätigt in den die Regressionsanalyse für die kritische Micellbildungskonzentration einen Wert von 44,8 und für die halbe CMC-Konzentration einen solchen von 59,7 mN/m, also eine sinkende Filmbruchspannung bei steigender Konzentration, ergibt. Eine zweite Bemerkung muss zur Tendenz der Schaumzerstörungseffizienz

bezüglich des Primärschaumflüssigkeitsanteils gemacht werden. Wie bereits erwähnt, kann dessen Einfluss nicht vom Einfluss des Schaumblasendurchmessers getrennt werden. Die Tendenz bei der Variation des Flüssigkeitsanteils ist eine abnehmende Effizienz mit zunehmendem Flüssigkeitsanteil. Wird mit Hilfe des Regressionsansatzes nach Gleichung (15) und der Regressionskonstanten nach Tabelle 1 der alleinige Einfluss des Flüssigkeitsanteils untersucht (d.h. insbesondere bei konstantem Schaumblasendurchmesser), so ergibt sich eine steigende Schaumzerstörungseffizienz mit zunehmendem Flüssigkeitsanteil, also gerade die entgegen gesetzte Tendenz. Messungen mit verschiedenen Flüssigkeitsanteilen bei gleichem Schaumblasendurchmesser bestätigten jedoch diese Tendenz, ebenso wird sie in [5, 10] beschrieben. Diese Begebenheit kann wiederum als Qualitätsausweis für die physikalische Richtigkeit des gewählten Ansatzes beurteilt werden, da eine für die Regressionsanalyse nicht benutzte Tendenz richtig wiedergegeben wird.

## 5. Technische Folgerungen und Ausblick

Der heutige Stand des Wissens über das Verhalten von Schaum ist vor allem hinsichtlich der Schaumstabilität und dem schnellen mechanischen Angriff auf Schaumflüssigkeitslamellen sehr lückenhaft, und zusätzlich fehlen meistens die dazu notwendigen Stoffwerte. Trotzdem konnte mit einem neuartigen semi-empirischen Modellansatz, der auf der dynamischen Oberflächenspannung basiert, die experimentellen Schaumzerstörungseffizienzen in Funktion der variierten Betriebsparameter mit befriedigender Genauigkeit nachgerechnet werden.

Die vorgeschlagene Form der Effizienzgleichung wird ein Vergleich verschiedener apparativer Konzepte der Schaumzerstörung ermöglichen und zusätzlich nach der Einführung der leistungsbezogenen Effizienz ein Maß für die Effektivität des Schaumzerstörungsprozesses bilden.

### Symbolverzeichnis

|                                |  |                         |
|--------------------------------|--|-------------------------|
| $V_{g,u}$                      | – Volumenstrom des freigesetzten Gases             | $[\text{m}^3/\text{s}]$ |
| $V_{g,0}$                      | – Anfangsgasanteil des Gases in der Schaumstruktur | $[\text{m}^3]$          |
| $V_{g,k}$                      | – Endanteil des Gases in der Schaumstruktur        | $[\text{m}^3]$          |
| $V_{c,0}$                      | – Flüssigkeitsvolumenanteil in der Schaumstruktur  | $[\text{m}^3]$          |
| $\varepsilon_0, \varepsilon_k$ | – Anfangs- und Endanteil des Gases                 |                         |
| $\eta_d$                       | – Schaumzerstörungseffizienz                       |                         |
| $\varphi_0, \varphi_k$         | – Flüssigkeitsanteil in der Schaumstruktur         |                         |
| $\sigma$                       | – Oberflächenspannung                              | $[\text{N/m}]$          |

## Literaturverzeichnis

- [1] Garret P. R.: *Defoaming: Theory and Industrial Applications*, , Mecel Dekker Inc., New York – Basel 1993.
- [2] Wilson A. S.: *Foams: Physic, Chemistry and Structure*, Springer Verlag, Berlin 1989.
- [3] Pahl M. H., Franke D.: *Chem.-Ing.-Techn.*, **67**, 1995, 300-312.
- [4] Gebbard K. F. et all: *Blasenerzeugung, Blasenkoaleszenz und Schaumstabilität unter Mikrogravitationsbedingungen*, BMFT-FB-W-8602, 1986.
- [5] Tichomirov W. K.: *Pieny – teoria i praktika ich poutschenija i rozruschenija*, Izdatielstwo Chimia, Moskwa1983.
- [6] Mollet H., Grubemann A.: *Formulierungstechnik – Emulsionen, Suspensionen, Fest Forme*, Viley-VCh, Weinheim, N. York 2000.
- [7] Viestors U. E., Kristapsons M. Z.: *Advances in Biochemical Engineering*, Springer-Verlag, Berlin 1982.
- [8] Wyczałkowski W.: *Chem. Techn.* **10**, 1976, 595.
- [9] Rubin E., Golt M.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Development*, **2**, 1970, 341.
- [10] Dyląg M., Kamieński J., Rosiński J.: *Inż. i Ap. Chem.*, **46**, 2007, 51.
- [11] Kovscek A. R., Radke C. S.: *Fundamentals of Foam Transport in Porous Media*, Topic Raport, U.S. Department of Energy, October 1993.
- [12] Weiler C.: *Zur Messung oberflächenrheologischer Stoffgrößen*, Fortschr.-Berichte VDI-2, **23**, 1991, 236.
- [13] Raport z realizacji projektu badawczego MNiSzW nr 3 T09C 040 26, Kraków 2007.