

## Kurzzmitteilung

# Einfluss der Flüssigkeitsviskosität auf das rheologische Verhalten von Schäumen<sup>‡</sup>

Meike Lexis\* und Norbert Willenbacher

DOI: 10.1002/cite.201200128

Die rheologischen Eigenschaften von Schäumen sind für die Qualität vieler Produkte von entscheidender Bedeutung. Um die charakteristischen Parameter scheinbare Fließgrenze und Speichermodul bei Kenntnis der physikalischen Eigenschaften Blasengröße, Oberflächenspannung und Gasvolumenanteil voraussagen zu können, existieren bereits Modellgleichungen. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass diese nicht alle Einflussgrößen berücksichtigen. Präsentiert wird eine empirische Modellgleichung, die den Einfluss der Viskosität der kontinuierlichen Phase berücksichtigt und die Verteilung der Blasengrößen auf physikalisch sinnvolle Weise einbezieht. Darüber hinaus wird verdeutlicht, dass Grenzflächeneigenschaften eine entscheidende Rolle für die Schaumrheologie spielen.

**Schlagwörter:** Flüssigkeitsviskosität, Protein, Rheologie, Schaum, Tensid*Eingegangen:* 31. Juli 2012; *revidiert:* 03. Dezember 2012; *akzeptiert:* 23. Mai 2013

## Effect of the Liquid Viscosity on the Rheological Behavior of Foams

The rheological properties of foams are of particular importance especially in the food sector. Already existing models allow for the prediction of the rheological parameters apparent yield stress and storage modulus when the physical properties bubble size, surface tension and gas volume fraction are known. This work demonstrates that these are not all influencing parameters. Here an extended empirical model is presented that takes the continuous phase viscosity into account and additionally includes the distribution of the bubble sizes in a physically meaningful way. Furthermore, it is shown that interfacial layer properties also play a crucial role in foam rheology.

**Keywords:** Foam, Liquid viscosity, Protein, Rheology, Surfactant

## 1 Einleitung

Unter Schaum versteht man die Verteilung von Gasblasen in einer Flüssigkeit bzw. einem Feststoff, wobei das Gasvolumen groß im Vergleich zu dem der kontinuierlichen Phase ist. Dieses disperse System besitzt völlig andere rheologische Eigenschaften als die einzelnen Phasen. So verhält es sich z. B. unter kleinen Spannungseinwirkungen wie ein

viskoelastischer Feststoff, unter größeren Spannungen jedoch wie eine Flüssigkeit.

Dieses ungewöhnliche mechanische Verhalten von Schäumen in Kombination mit der niedrigen Dichte und hohen spezifischen Oberflächenenergie führt zu einer großen Vielfalt an industriellen Anwendungen [1], die von besonderem Interesse in einer Vielzahl von Kosmetikartikeln, Arzneimitteln, Waschmitteln und vor allem Lebensmitteln sind.

### 1.1 Schaumrheologie

Schäume können eine scheinbare Fließgrenze  $\tau_y$  besitzen, d. h. es existiert eine Schubspannung  $\tau$ , unterhalb der sich der Schaum annähernd wie ein viskoelastischer Feststoff verhält und oberhalb welcher der Schaum zu fließen beginnt. Bei diesem Übergang verringert sich die Viskosität

Meike Lexis (meike.lexis@kit.edu), Prof. Dr. Norbert Willenbacher, Karlsruher Institut für Technologie, Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Gotthard-Franz-Straße 3, 76131 Karlsruhe, Deutschland.

<sup>‡</sup> Vortrag beim ProcessNet Jahrestreffen des Fachausschusses Lebensmittelverfahrenstechnik, Rheologie und Trocknungstechnik, 21. März 2012, Hohenheim, Deutschland.

um mehrere Zehnerpotenzen. Dass die Fließgrenze scheinbarer Natur ist, zeigt eine, wenn auch sehr hohe, schubspannungsunabhängige Viskosität, die unterhalb der Fließgrenze gemessen werden kann. In diesem Bereich lässt sich aufgrund des ausgeprägten Feststoffcharakters ein Speichermodul  $G'$  bestimmen, der ebenfalls eine wichtige rheologische Messgröße darstellt.

Es wurden bereits verschiedene mathematische Modellgleichungen vorgeschlagen [2–4], um diese rheologischen Größen mit den physikalischen Stoffeigenschaften des Schaums in Verbindung zu bringen. Als Parameter wurden der Gasvolumenanteil  $\phi$ , die Oberflächenspannung  $\sigma$  und der oberflächenbezogene mittlere Blasenradius  $r_{32}$  berücksichtigt. Unbeachtet blieben die Viskosität der kontinuierlichen Phase, die Blasengrößenverteilung sowie die viskoelastischen Eigenschaften der Grenzflächen. Im vorliegenden Beitrag wird verdeutlicht, dass diese letztgenannten Größen ebenso einen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften der Schäume haben. Es werden zwei Schaumsysteme gegenüber gestellt, die einerseits mithilfe eines Molkenproteinisolats, andererseits mithilfe einer Mischung niedermolekularer, synthetischer Tenside hergestellt wurden.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Schaumbildner und Schaumerzeugung

Zur Herstellung der Proteinschäume wurde 1 Gew.-% Molkenproteinisolat (WPI, Fonterra), für die Herstellung der Tensidlösungen, 2 Gew.-% des nichtionischen Tensids Triton X100 ( $C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_n$ ,  $n = 9-10$ , BASF) und 0,2 Gew.-% des anionischen Tensids SDS/Natriumlaurylsulfat ( $C_{12}H_{25}NaO_4S$ , Roth) in destilliertem Wasser gelöst. Die Viskosität wurde durch Zugabe von Glycerin ( $\geq 99,5\%$ , Carl Roth) in einem Bereich von 1–12 mPa s variiert. Der pH-Wert aller Lösungen wurde im nativen Zustand bei pH 7 belassen. Anschließend wurden die Lösungen mithilfe der in Abb. 1 dargestellten Schaumapparatur aufgeschäumt. Diese besteht aus einem Glasfilter (Porenweite 9–16  $\mu\text{m}$ ), der in ein zylindrisches Glasrohr (Durchmesser = 60 mm,

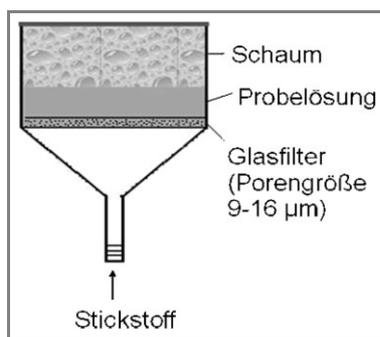


Abbildung 1. Aufschäumapparatur.

Höhe = 53 mm) eingeschmolzen ist. Aus den Tensidlösungen ließen sich schon bei 20 °C stabile Schäume herstellen, die sich während der Dauer der rheologischen Messungen von 60 s weder bezüglich ihrer Blasengrößenverteilung noch in Bezug auf ihren Gasvolumenanteil signifikant veränderten. Bei den Proteinlösungen war dies erst nach einer Erwärmung auf 60 °C der Fall, weswegen die Lösungen vor dem Aufschäumen in einem Wasserbad auf die entsprechende Temperatur erhitzt wurden. Die aufzuschäumende Lösung wurde auf den Glasfilter gegeben und Stickstoff mit einem Volumenstrom von 60 mL min<sup>-1</sup> von unten in die Lösung dispergiert. Sobald das Aufschäumrohr vollständig mit Schaum gefüllt war, wurde der Stickstoffstrom abgestellt und die Zeiterfassung zur Bestimmung des Schaumalters gestartet.

### 2.2 Eigenschaften der Lösungen

Die Scherviskositäten der untersuchten Tensid- und Proteinlösungen wurden mit dem deformationsgesteuerten Torsionsrheometer ARES der Firma TA Instruments mit einer Doppelspalt-Couette-Geometrie (32/34 mm) bei Scherraten zwischen 10–250 s<sup>-1</sup> gemessen. Alle Lösungen zeigten innerhalb dieses Messbereichs newtonsches Verhalten. Für die Tensidlösungen wurden die Messungen bei 20 °C durchgeführt und für die Proteinlösungen bei den entsprechenden Temperaturen, die die Schäume bei ihrer rheologischen Vermessung besaßen. Der Temperatur-Zeit-Verlauf wurde für jeden Schaum zuvor gleichzeitig mit der Leitfähigkeitsmessung (s. Abschn. 2.3) aufgenommen, wodurch die Schaumtemperatur zu jedem Zeitpunkt bekannt war.

Die Oberflächenspannungen wurden für die Tensidlösungen mithilfe eines Wilhelmy-Platten-Tensiometers (Dataphysics, DCAT 11) bei 21 °C und für die Proteinlösungen, ebenfalls bei 21 °C, mittels der Methode des hängenden Tropfens (Dataphysics SCA 20) für die Dauer von 20 Minuten gemessen. Nach dieser Zeit erreichten alle Oberflächenspannungen der Proteinlösungen annähernd einen Plateauwert, der für die Berechnungen des Laplace-Drucks (s. Abbn. 6–8) verwendet wurde. Die Oberflächenspannungen der Proteinschäume sind nicht nur zeit- sondern zusätzlich temperaturabhängig, was, wie Nino et al. [12] in ihren Untersuchungen fanden, hauptsächlich auf der temperaturabhängigen Änderung der Oberflächenspannung des Wassers beruht. Während der rheologischen Messungen besaßen die Proteinschäume, abhängig von ihrem Alter, Temperaturen zwischen 23 und 35 °C. Die Plateauwerte sind bezogen auf die wahren Oberflächenspannungen; folglich für die jüngeren Schäume einerseits zu niedrig, weil aufgrund der Zeitabhängigkeit noch nicht so viele Proteine an der Oberfläche adsorbiert waren und andererseits zu hoch, weil die Schäume zu Beginn höhere Temperaturen besaßen. Unter Einbeziehung der Ergebnisse von Nino et al. kann die Abweichung zwischen wahrer Oberflächenspannung und gemessenem Plateauwert auf weniger als 5 % geschätzt werden.

## 2.3 Schaumeigenschaften

Der Gasvolumenanteil der hergestellten Schäume wurde in Abhängigkeit des Schaumalters mithilfe einer Leitfähigkeitselektrode (WTW, Cond 340i) bestimmt. Dabei wurde die Leitfähigkeit des Schaums und die der zu schäumenden Lösung ins Verhältnis gesetzt ( $\kappa = \kappa_{\text{Foam}}/\kappa_{\text{Liquid}}$ ) und über Gl. (1) daraus der Gasvolumenanteil  $\phi$  berechnet [5]. Da die Proteinschäume mit zunehmendem Alter abkühlen, wurde für die Proteinlösungen zuvor die temperaturabhängige Leitfähigkeit erfasst, so dass die den Schaumtemperaturen entsprechenden  $\kappa$ -Werte berechnet werden konnten.

$$\phi = 1 - \frac{3\kappa(1 + 11\kappa)}{1 + 25\kappa + 10\kappa^2} \quad (1)$$

Die Bestimmung der Blasengrößenverteilung wurde mithilfe einer hochauflösenden endoskopischen CCD-Kamera (Lumenera LU 160; Auflösung  $1392 \times 1040$ ) durchgeführt. Das Endoskop (Durchmesser = 8 mm) wurde in den Schaum eingetaucht und es wurden an verschiedenen Stellen Bilder aufgenommen. Die anschließende Bildauswertung erfolgte mit der Software iPS von Visiometrics.

## 2.4 Rheologische Messungen an Schäumen

Die scherrheologischen Messungen wurden mit einem Platte-Platte-System (Durchmesser = 60 mm) am Schubspannungsgesteuerten Rotationsrheometer Rheostress RS-1 (Thermo Haake) durchgeführt. Die Platten wurden mit Schleifpapier (Körnung 40) beklebt, um Wandgleiteneffekte zu vermeiden.

Zur Bestimmung der scheinbaren Fließgrenze  $\tau_y$  und der Nullviskosität  $\eta_0$  wurde die Probe mit einer logarithmisch ansteigenden Schubspannung geschert. Der Plattenabstand wurde auf 5 mm festgelegt, da sich in Vorversuchen gezeigt hat, dass dann Wandgleiteneffekte vernachlässigt werden können. Die Dauer der Messzeit wurde auf 60 s beschränkt, um die während der Messung auftretenden Alterungsprozesse des Schaums einzuschränken. Die Abkühlung der Protein-

schäume während der Messung lag bei maximal 1,5 °C. Für die oszillatorischen Messungen wurde die Schubspannungsamplitude bei einer konstanten Frequenz von 1 Hz variiert. Auch hier wurde die Messdauer auf 60 s beschränkt.

Die Auswertung zur Festlegung der rheologisch relevanten Messgrößen erfolgte wie in Abb. 2 dargestellt. Die Fließgrenze wurde über die Tangenten-Schnittpunkt-Methode ermittelt [6] und die Nullviskosität als mittlerer Viskositätswert im schubspannungsunabhängigen Bereich festgelegt. Der Speichermodul wurde als Mittelwert von  $G'$  im linear viskoelastischen Bereich bestimmt. In Vorversuchen wurde gezeigt, dass dieser Modulwert in einem weiten Bereich frequenzunabhängig ist. Diese Größe wird daher als Plateauwert  $G_0$  des Speichermoduls bezeichnet.

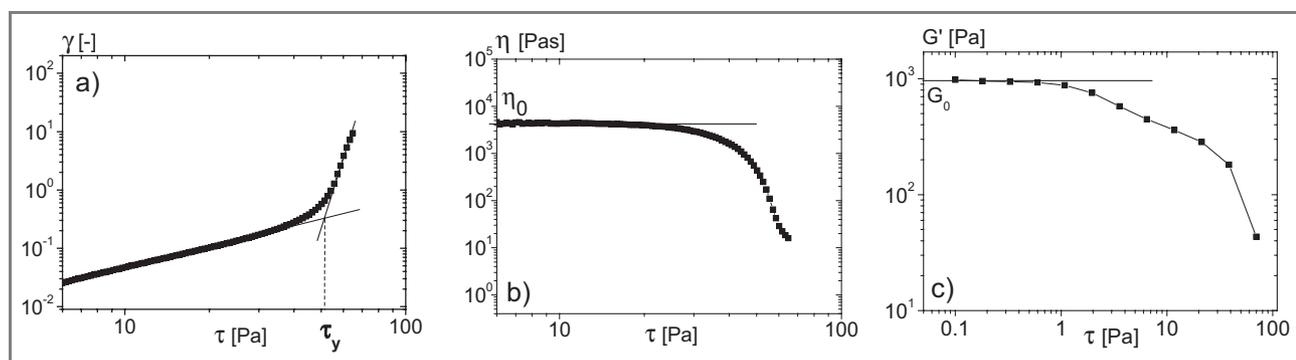
## 3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Unterschiedliche Blasengrößenverteilungen

Der Einfluss der Blasengrößenverteilung wird deutlich, wenn man die maximale Packungsdichte  $\phi_c$  betrachtet. Verschiedene experimentelle Studien [2, 11] zeigen, dass Fließgrenze und elastische Eigenschaften erst oberhalb eines bestimmten kritischen Wertes für den Gasvolumenanteil auftreten. Unter der physikalisch sinnvollen Annahme, dass dieser kritische Gasvolumenanteil durch die maximale Packungsdichte gegeben ist, bedeutet eine breitere Blasengrößenverteilung, d.h. eine höhere maximale Packungsdichte, für den Schaum, dass diese Eigenschaften erst bei höheren Gasvolumenanteilen auftreten. Um aus den gemessenen Blasengrößenverteilungen diese maximale Packungsdichte  $\phi_c$  zu berechnen, wurde folgende Modellgleichung verwendet (Gl. (2)), die basierend auf Experimenten mit hochkonzentrierten Glaskugelsuspensionen entwickelt wurde [7]:

$$\phi_c = \phi_n - (\phi_n - \phi_{c,\text{mono}}) \exp\left(0,271 - \left(1 - \frac{r_5}{r_1}\right)\right) \quad (2)$$

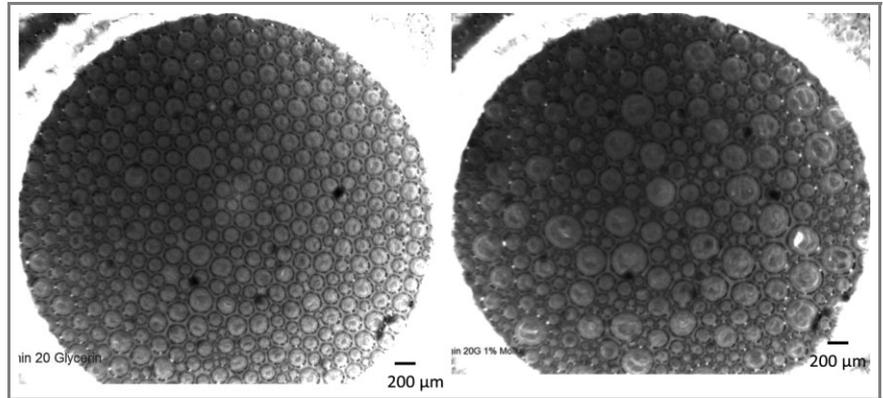
$$\text{mit } \phi_n = 1 - (1 - \phi_{c,\text{mono}})^n \text{ und } r_x = \frac{\sum_{i=1}^n N_i r_i^x}{\sum_{i=1}^n N_i r_i^{x-1}}$$



**Abbildung 2.** Bestimmung der rheologischen Größen am Beispiel eines Proteinschaums. a) Bestimmung der Fließgrenze  $\tau_y$  über die Tangenten-Schnittpunkt-Methode, b) Bestimmung der Nullviskosität  $\eta_0$ , c) Bestimmung des Plateauwertes des Speichermoduls  $G_0$ .

Dabei ist  $\phi_c$  die maximale Packungsdichte einer n-modalen Suspension kugelförmiger Partikel,  $\phi_{c,mono}=0,63$  der entsprechende Wert einer monodispersen Suspension und  $r_x$  das x-te Moment der Partikelgrößenverteilung.

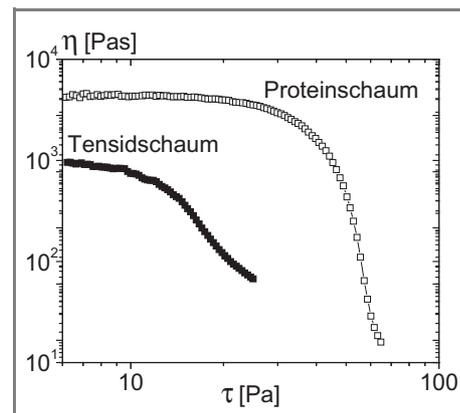
Für die Tensidschäume wurden je nach Alter  $\phi_c$ -Werte zwischen 0,65 und 0,69, für die Proteinschäume Werte zwischen 0,71 und 0,75 ermittelt. In diesen Werten spiegelt sich bereits ein grundlegender Unterschied im Adsorptionsverhalten der beiden Schaumbildner wider. Die Tenside sind sehr beweglich, können schnell zu neu entstandenen Grenzflächen diffundieren und dort adsorbieren, während die Adsorption der hier globulär vorliegenden Proteine ein langsamerer Prozess ist [8]. Das führt im Fall der Tenside zu einer engeren Blasengrößenverteilung, weil neu entstandene Grenzflächen umgehend stabilisiert werden können und im Fall der Proteine umgekehrt zu einer breiteren Verteilung, da die Moleküle nicht schnell genug an der neuen Grenzflächen adsorbieren können, bevor Koaleszenzvorgänge stattfinden können (s. Abb. 3).



**Abbildung 3.** Blasengrößenverteilung für einen Tensidschaum (links) und einen Proteinschaum (rechts) jeweils im Alter von 2 min bei gleicher Viskosität der kontinuierlichen Phase.

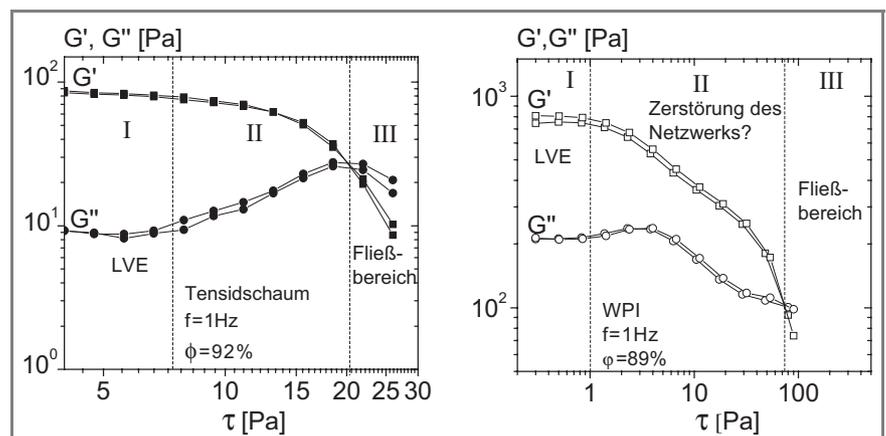
### 3.2 Charakteristische rheologische Unterschiede zwischen Tensid- und Proteinschäumen

In Abb. 4 und 5 ist exemplarisch das Verhalten eines Tensidschaums und eines Proteinschaums in stetiger und oszillatorischer Messung gegenübergestellt. Vergleicht man die rheologischen Eigenschaften der untersuchten Tensid- und Proteinschäume, so wird deutlich, dass der Beschaffenheit der Grenzfläche eine entscheidende Rolle zukommt. Der Proteinschaum zeigt eine deutlich höhere scheinbare Fließgrenze, eine höhere Nullviskosität wie auch einen höheren Speichermodul als der Tensidschaum bei annähernd identischen physikalischen Eigenschaften. Es ist bekannt, dass Tenside eher flexible, bewegliche Adsorptionsschichten ausbilden, wohingegen Proteine zur Bildung stabiler, steifer Membranen tendieren [9]. Hierin könnte der Grund für das unterschiedliche rheologische Verhalten zu finden sein. Zusätzlich weichen die Kurvenverläufe des Schubspannungsamplitudensweeps (Abb. 5) teilweise stark voneinander ab. Bei beiden Systemen lässt sich ein linear viskoelastischer Bereich (I) und ein Fließbereich (III), letzterer begin-



**Abbildung 4.** Unterschiedliches Verhalten eines Tensid- ( $\phi = 0,85$ ;  $\sigma/r_{32} = 424$  Pa,  $\eta_L = 4,2$  mPa s) und Proteinschaums ( $\phi = 0,83$ ;  $\sigma/r_{32} = 388$  Pa,  $\eta_L = 3,8$  mPa s) in stetiger Schermessung.

nend mit dem Schnittpunkt von  $G'$  und  $G''$ , feststellen. Der Verlauf der Moduln im Übergangsbereich (II) ist jedoch bei den Proteinschäumen völlig anders als bei den Tensid-



**Abbildung 5.** Unterschiedliches Verhalten eines Tensid- (links) und Proteinschaums (rechts) in oszillatorischer Messung.

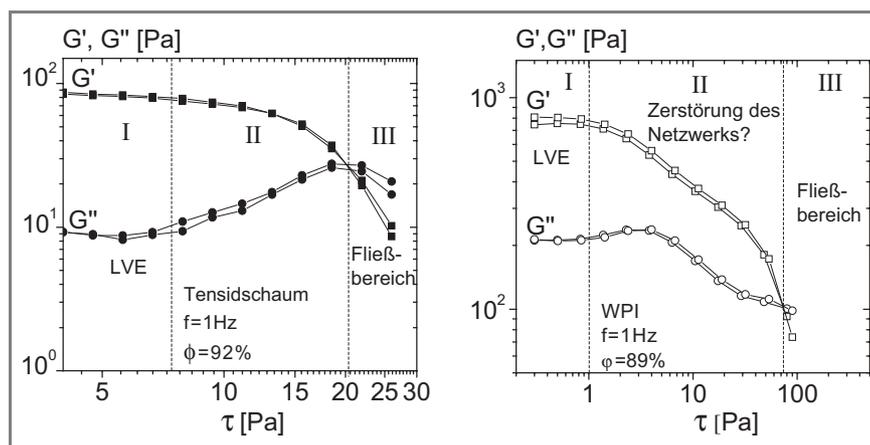
schäumen. Während sich bei dem Tensidschaum  $G'$  und  $G''$  kontinuierlich aufeinander zubewegen, nehmen die Moduln für den Proteinschaum teilweise beide ab bevor sie sich schneiden. Der Grund dafür könnte eine Vermetzung der Proteine untereinander sein, die sich in den Lamellen zwischen benachbarten Gasblasen ausbilden und deren Struktur in diesem zweiten Bereich zerstört wird.

### 3.3 Einfluss der Flüssigkeitsviskosität auf die scheinbare Fließgrenze

Die Auswirkung der Erhöhung der Flüssigkeitsviskosität auf die scheinbare Fließgrenze  $\tau_y$  ist in Abb. 6a für das Tensidschaumsystem dargestellt. Um den Einfluss der mittleren Blasengröße auszuschließen, wurde die Fließgrenze auf den Laplace-Druck normiert. Eine höhere Flüssigkeitsviskosität resultiert in einer höheren scheinbaren Fließgrenze der Schäume bei gleichem Gasvolumenanteil.

Alle Messdaten, für die Tensid- wie auch für die Proteinschaumsysteme, lassen sich jeweils auf einer Masterkurve zusammenführen, indem man die  $\tau_y$ -Daten mit dem Faktor  $(\eta_L/\eta_W)^{-0,3}$  multipliziert (Abb. 6b), wobei  $\eta_L$  die Viskosität der Flüssigkeit und  $\eta_W$  die Viskosität von Wasser bei den jeweils zugehörigen Schaumtemperaturen sind. Dieser empirisch bestimmte, dimensionslose Faktor beschreibt den Einfluss der Viskosität der kontinuierlichen Phase auf die Fließgrenze eines Schaums, unabhängig von dessen Gasvolumenanteil oder den Grenzflächeneigenschaften des verwendeten Tensids bzw. Proteins. Insgesamt lässt sich die scheinbare Fließgrenze eines Schaums, ausgehend von der von Marze et al. [2] vorgeschlagenen Gleichung, folgendermaßen beschreiben:

$$\tau_y = k \frac{\sigma}{r_{32}} \left( \frac{\eta_L}{\eta_W} \right)^{0,3} (\phi - \phi_c)^2 \quad (3)$$



**Abbildung 6.** a) Fließgrenze auf Laplace-Druck normiert als Funktion des Gasvolumenanteils für unterschiedliche Flüssigkeitsviskositäten für Tensidschäume; b) Masterkurve der normierten Fließgrenzen.

Wenn man  $\phi_c$  aus der Blasengrößenverteilung wie oben beschrieben berechnet, erlaubt diese phänomenologische Modellgleichung eine Vorhersage der Fließgrenze bei Kenntnis der oben genannten physikalischen Parameter. Es verbleibt der unbestimmte Vorfaktor  $k$ , der für das hier untersuchte Proteinsystem ca. fünfmal höher als für das Tensidsystem ist. Dies ist vermutlich, wie oben schon erwähnt, in den verschiedenartigen viskoelastischen Grenzflächeneigenschaften begründet.

### 3.4 Einfluss der Flüssigkeitsviskosität auf den Speichermodul

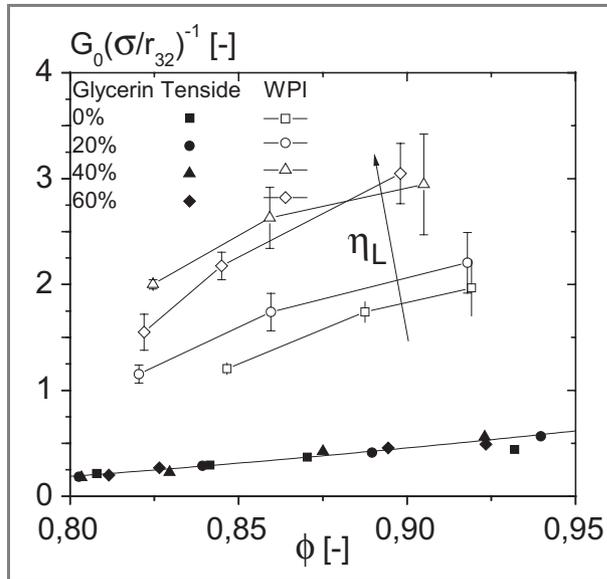
Die Variation der Flüssigkeitsviskosität durch Zugabe von Glycerin wirkt sich in Bezug auf den Speichermodul  $G'$  unterschiedlich auf die beiden untersuchten Schaumsysteme aus. Auf den Laplace-Druck normiert lässt sich für die Tensidschäume kein Einfluss der Viskosität der kontinuierlichen Phase auf den Speichermodul feststellen, wohingegen der Modul der Proteinschäume mit zunehmender Viskosität merklich ansteigt (Abb. 7). Eine Erklärung hierfür liegt vermutlich in den intermolekularen Wechselwirkungen. Durch die mit Zunahme des Glycerinanteils einhergehende Erniedrigung der Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon$  ( $\epsilon_{\text{Wasser}} = 81$ ,  $\epsilon_{\text{Glycerin}} = 43$  [13]) werden die abstoßenden Kräfte zwischen den Proteinen vermindert [10], wodurch die Belagungsdichte an der Grenzfläche ansteigt. Durch diese dichtere Packung wird vermutlich die Grenzflächenelastizität verstärkt und dadurch ein Anstieg des Bulkspeichermoduls verursacht. Für die Oberflächenspannung der Proteinlösungen wurden bei 21 °C, abhängig vom Glycerinanteil, Werte von 49,2–51,4 mN m<sup>-1</sup> gemessen.

Im Fall der Tensidschäume hat die Änderung der dielektrischen Eigenschaften weder Einfluss auf den Bulkspeichermodul noch auf die Oberflächenspannung, die unabhängig vom Glycerinanteil bei 31,8 mN m<sup>-1</sup> liegt. Für dieses System lässt sich, ebenfalls ausgehend von der von Marze et al. [2] vorgeschlagenen Gleichung, eine einheitliche Modellgleichung zur Beschreibung der Messdaten finden:

$$G_0 = 2,1 \frac{\sigma}{r_{32}} \phi (\phi - \phi_c) \quad (4)$$

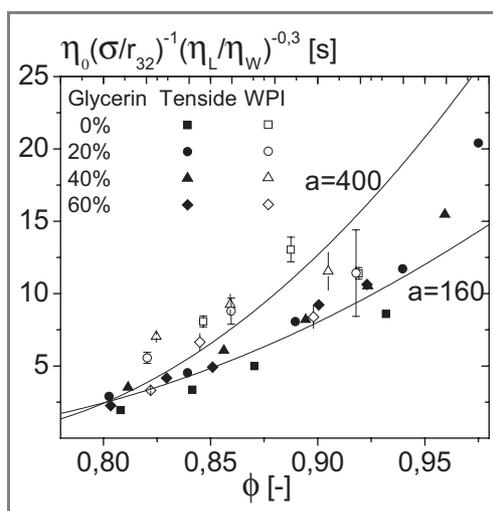
### 3.5 Einfluss der Flüssigkeitsviskosität auf die scheinbare Nullviskosität

Die scheinbare Nullviskosität  $\eta_0$  hängt, anders als die Fließgrenze, von Messbedingungen wie Anfangs- und Endschubspannung oder Dauer der Messzeit pro Messpunkt ab.



**Abbildung 7.** Plateauwert des Speichermoduls der Tensid- und Proteinschäume auf den Laplace-Druck normiert als Funktion des Gasvolumenanteils für unterschiedliche Flüssigkeitsviskositäten.

Daher sollten nur scheinbare Nullviskositäten, die unter gleichen Messbedingungen ermittelt wurden, miteinander verglichen werden, was in dieser Arbeit berücksichtigt wurde. Die scheinbaren Nullviskositäten zeigten für beide Schaumsysteme eine Abhängigkeit von der Flüssigkeitsviskosität. Wird diese erhöht, so steigt die Nullviskosität an. Der bereits bei der Fließgrenzenabhängigkeit (Abschn. 3.3) gefundene Faktor  $(\eta_L/\eta_W)^{0,3}$  bringt auch die Messdaten der Nullviskositäten für beide Schaumsysteme auf je einer Masterkurve zusammen (Abb. 8), wenn zusätzlich noch der



**Abbildung 8.** Nullviskosität der Tensid- und Proteinschäume auf den Laplace-Druck normiert als Funktion des Gasvolumenanteils für unterschiedliche Flüssigkeitsviskositäten.

Einfluss des Laplace-Drucks durch Normierung mit dem Faktor  $\sigma/r_{32}$  eliminiert wird:

$$\eta_0 = a \frac{\sigma}{r_{32}} \left( \frac{\eta_L}{\eta_W} \right)^{0,3} (\phi - \phi_c)^2 \quad (5)$$

Die Bestimmbarkeit der Nullviskosität weist darauf hin, dass im Bereich kleiner Schubspannungen Fließprozesse stattfinden, die mit zunehmender Flüssigkeitsviskosität und zunehmenden Gasanteil geringer werden. Für die Tensid- bzw. Proteinschäume findet man unterschiedliche Vorfaktoren  $a$ , was wiederum darauf hindeutet, dass auch  $\eta_0$  von Grenzflächenphänomenen beeinflusst wird.

## 4 Zusammenfassung

Es wurde untersucht, welche Parameter Einfluss auf die Rheologie von Schäumen nehmen. Dabei wurde deutlich, dass bereits existierende Modelle, wie das von Princen und Kiss oder Marze et al., nur unzureichende Beschreibungen liefern. Bislang wurden lediglich der Gasvolumenanteil, der Blasendurchmesser und die Oberflächenspannung als maßgeblich für die rheologischen Eigenschaften von Schäumen betrachtet. Hier konnte gezeigt werden, dass die Viskosität der kontinuierlichen Phase sowie die Eigenschaften der Grenzfläche ebenfalls wichtige Einflussparameter darstellen. Es wurden neue Modellgleichungen aufgestellt, in denen beide Parameter berücksichtigt werden. Ebenfalls wurde eine Methode vorgeschlagen, um die Breite der Blasengrößenverteilung zu berücksichtigen. Dafür wird die maximale Packungsdichte aus gemessenen Blasengrößenverteilungen berechnet und diese als kritischer Gasvolumenanteil  $\phi_c$  betrachtet, der für den Übergang von Flüssigkeit zu viskoelastischem Feststoff steht. Es wird angenommen, dass für Gasvolumenanteile oberhalb dieses kritischen Wertes scheinbare Fließgrenze sowie elastische Eigenschaften auftreten. Die Quantifizierung des Einflusses der Grenzflächeneigenschaften fehlt bislang und ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten. Mit Kenntnis aller genannten Einflussparameter wird es möglich sein, eine Voraussage darüber zu treffen, welche Fließeigenschaften aus der Verschäumung einer bestimmten Lösung resultieren. Diese sowohl bei der Herstellung, Verarbeitung wie auch beim Verzehr wichtigen Eigenschaften können so gezielt verändert oder angepasst werden. Dies ist ein wichtiger Fortschritt für die bisher kaum erforschte Verknüpfung zwischen mikroskopischen und makroskopischen Schaumeigenschaften.

### Formelzeichen

$a$	[s]	Modellparameter
$G_0$	[Pa]	Speichermodul im linear viskoelastischen Bereich
$G'$	[Pa]	Speichermodul

$G''$	[Pa]	Verlustmodul
$k$	[-]	Modellparameter
$r_{32}$	[m]	Sauter-Radius

## Griechische Symbole

$\varepsilon$	[-]	Dielektrizitätskonstante
$\phi$	[-]	Gasvolumenanteil
$\phi_c$	[-]	maximale Packungsdichte einer n-modalen Suspension kugelförmiger Partikel
$\phi_{c,mono}$	[-]	maximale Packungsdichte einer monomodalen Suspension kugelförmiger Partikel
$\gamma$	[-]	Scherrate
$\eta_0$	[Pa s]	scheinbare Nullviskosität
$\eta_L$	[Pa s]	Viskosität kontinuierliche Phase
$\eta_W$	[Pa s]	Viskosität Wasser
$\kappa$	[-]	Verhältnis von Schaumleitfähigkeit und Leitfähigkeit der zugehörigen kontinuierlichen Phase bei gleicher Temperatur
$\kappa_{Foam}$	[mS cm <sup>-1</sup> ]	Schaumleitfähigkeit
$\kappa_{Liquid}$	[mS cm <sup>-1</sup> ]	Flüssigkeitsleitfähigkeit
$\sigma$	[mN m <sup>-1</sup> ]	Oberflächenspannung
$\sigma_W$	[mN m <sup>-1</sup> ]	Oberflächenspannung Wasser
$\tau$	[Pa]	Schubspannung
$\tau_y$	[Pa]	scheinbare Fließgrenze

## Literatur

- [1] R. K. Prud'homme, S. A. Khan, *Foams – Theory, Measurements, and Applications*, Surfactant Science Series, Vol. 57, Marcel Dekker, New York 1996.
- [2] S. Marze, R. M. Guillermic, A. Saint-Jalmes, *Soft Matter* **2009**, 5, 1937–1946. DOI: 10.1039/B817543H
- [3] H. M. Princen, A. D. Kiss, *J. Colloid Interface Sci.* **1986**, 112 (2), 427–437.
- [4] H. M. Princen, A. D. Kiss, *J. Colloid Interface Sci.* **1989**, 128 (1), 176–187.
- [5] K. Feitosa, S. Marze, A. Saint-Jalmes, D. J. Durian, *J. Phys.: Condens. Matter* **2005**, 17, 6301–6305. DOI: 10.1088/0953-8984/17/41/001
- [6] T. D. Mezger, *Das Rheologiehandbuch*, Vincentz Network, Hannover 2006.
- [7] R. D. Sudduth, *J. Appl. Polym. Sci.* **1993**, 48, 37–55.
- [8] A. Saint-Jalmes, M. L. Peugeot, H. Ferraz, D. Langevin, *Colloids Surf. A* **2005**, 263, 219–225.
- [9] M. A. Bos, T. van Vliet, *Adv. Colloid Interface Sci.* **2001**, 91, 437–471.
- [10] G. Westphal, G. Gerber, B. Lipke, *Proteine – nutritive und funktionelle Eigenschaften*, Springer-Verlag, Berlin 2003.
- [11] T. G. Mason, J. Bibette, D. A. Weitz, *J. Colloid Interface Sci.* **1996**, 179, 439–448.
- [12] M. Niño, C. Sánchez, M. Fernández, J. Patino, *J. Am. Oil Chem. Soc.* **2001**, 78, 873–879.
- [13] L. Bergmann, C. Schaefer, *Lehrbuch der Experimentalphysik: Bd. 2 Elektromagnetismus*, 8. Aufl., de Gruyter, Berlin 1999.

DOI: 10.1002/cite.201200128

## Einfluss der Flüssigkeitsviskosität auf das rheologische Verhalten von Schäumen

*M. Lexis\*, N. Willenbacher*

Die Vorhersage der rheologischen Parameter scheinbare Fließgrenze und Speichermodul von Schäumen ist seit vielen Jahren Ziel intensiver Forschung. Diese Arbeit erweitert nun bereits bestehende mathematische Modellgleichungen und bezieht neben dem Laplace-Druck und dem Gasvolumenanteil zusätzlich die Viskosität der kontinuierlichen Phase sowie die Breite der Blasengrößenverteilung ein. ....

