

WEICHE MATERIE

Physik für Schaumschläger

Schäume sind allgegenwärtig und ein faszinierendes Forschungsobjekt – nicht nur der Physik.

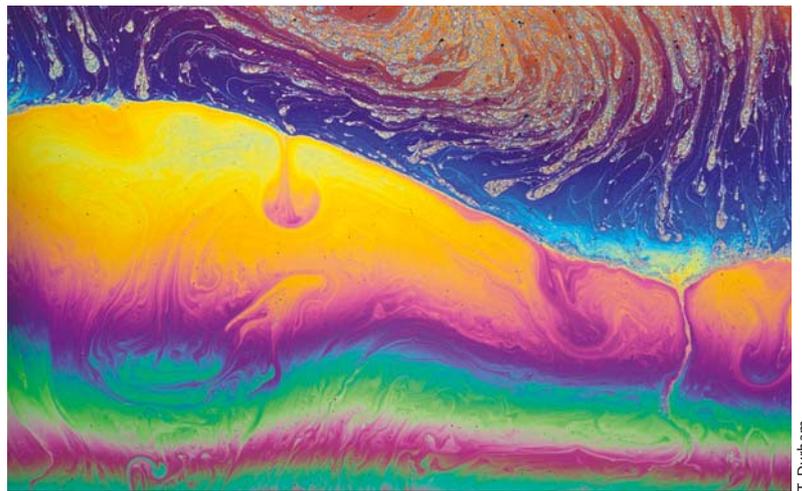
Wiebke Drenckhan

Seit jeher verzaubern die filigranen Seifenblasen Menschen aller Altersstufen. Interferenzen des Lichts an ihren dünnen Filmen erzeugen die reinsten und intensivsten Farben, die wir aus der Natur kennen. Viele Blasen zusammengesetzt ergeben einen Schaum, ein komplexes Material, das einen wichtigen Platz in der Physik der weichen Materie einnimmt und eine große Bandbreite von Anwendungen abdeckt – vom Bierzapfen bis zur Schaummatratze.

Wer sich einmal bewusst umschaute, stellt fest, dass wir im Alltag geradezu von Schäumen – sowohl flüssiger als auch fester Natur – umgeben sind [1–4]. Ob Schlagsahne, Badeschaum, die Blume eines frisch gezapften Bieres, Materialien für die Wärme- oder Schalldämmung – sie alle bieten eine große Bandbreite äußerst nützlicher Eigenschaften. Dabei bedient sich nicht nur der Mensch dieser löchrig-substanzen. Auch die Natur weiß ihre Vorteile zu nutzen. So sind Knochen und Kork trotz ihrer Leichtigkeit sehr stabil. Und im Frühling begegnen dem aufmerksamen Spaziergänger schaumbekleidete Wiesen, denn die Schaumzikade verbirgt ihre Larven in einem hochviskosen Schaum, der nicht nur vor Stößen und Hitze schützt, sondern auch sehr effektiv die UV-Strahlung streut.

Vor allen Dingen Flüssigschäume halten Physiker in Bann. Denn diese sind besonders eigenwillige Materialien, die sich aufgrund der Wechselwirkung der Blasen mal wie ein Festkörper und mal wie eine zähe Flüssigkeit verhalten, je nachdem, welchen Kräften sie ausgesetzt sind. Zum Beispiel sitzt eine „Mousse au Chocolat“ so lange geduldig auf unserem Löffel, bis wir es schmackhaft und problemlos zwischen Gaumen und Zunge schmelzen lassen. In Fachkreisen sind Flüssigschäume daher mittlerweile ein populäres Beispiel für die so genannten „visko-elastisch-plastischen yield-stress Fluide“ geworden – ein Teilgebiet innerhalb der „Weichen Materie“, in der auch dubiose Substanzen wie Sand oder Polymerlösungen zu Hause sind.

Um stabile Schäume zu erzeugen, benötigt man spezielle Produkte, im bekanntesten Fall Seife. Diese enthält „schizophrene“ amphiphile Moleküle in Form von Tensiden, die aus einem wasserliebenden (hydrophilen) Kopf und einem wasserabstoßenden (hydrophoben) Schwanz bestehen [5]. Da es Energie kostet, sich in einer unbeliebten Umgebung zu befinden,



T. Durham

Schillernde Lichtinterferenzen geben Aufschluss über die Dicke von Flüssigkeitsfilmen, sie inspirieren aber auch zu äußerst ästhetischen Bildern, wie dieses Foto eines Spülmittelfilms zeigt.

halten sich solche Moleküle bevorzugt an den Wasser-Grenzflächen auf – beim täglichen Abwasch also an den Fettresten und in der Seifenblase an der Luft.

Die Wechselwirkung zwischen den an der Grenzfläche adsorbierten Molekülen senkt nicht nur signifikant die Oberflächenspannung, sondern hält auch die beiden Grenzflächen eines dünnen Seifenfilms auf Sicherheitsabstand [6]. Neben einer Bandbreite natürlich vorkommender oberflächenaktiver Moleküle gibt es mittlerweile eine unüberschaubare Fülle an synthetisch erzeugten Exemplaren mit verschiedensten Eigenschaften. Während, zum Beispiel, Seifenmoleküle reversibel an der Oberfläche adsorbiert sind, sind die Desorptionsenergien oberflächenaktiver Proteine oder Polymere im Allgemeinen so hoch, dass sie nicht nur

KOMPAKT

- Auf allen Längenskalen des Schaums verbirgt sich eine Fülle spannender und oft noch ungeklärter Fragen.
- An der Wasser/Luft-Grenzfläche gilt es, die Eigenschaften von Monolagen von Molekülen oder Teilchen zu verstehen sowie deren Kopplung mit den globalen Eigenschaften des Schaums.
- Dünne Filme und Kanäle, welche die Blasen trennen, sind Heimat für Minimalflächen- und Fluidynamikprobleme mit dynamischen Randbedingungen.
- Auf der Skala des gesamten Schaums stellen sich vor allem Fragen der Stabilität, der Struktur und einer komplexen Rheologie [7].

Dr. Wiebke Drenckhan, Laboratoire de Physique des Solides, UMR 8502, Université Paris-Sud, Bât. 510, 91405 Orsay cedex, Frankreich, drenckhan@lps.u-psud.fr

irreversibel an der Oberfläche verharren, sondern dort auch Aggregate bilden, die den Filmen eine zusätzliche Stabilität verleihen. Ähnliche Effekte sind zugange, wenn wir den extrem stabilen Eischnee (Eiweißschaum) schlagen.

Da die Oberflächenspannung von der Oberflächenkonzentration der Tenside abhängt, führen leichte Konzentrationsgradienten (z. B. aufgrund geringer Temperaturunterschiede) zu sog. Marangoni-Kräften, die für die immer wieder faszinierenden Farbwirbel in Seifenfilmen sorgen und außerdem zu einer Art „Selbsteilung“ der Filme beitragen: Wird ein Film abrupt an einer Stelle verdünnt, sinkt dort die Oberflächenkonzentration der Tenside. Die Oberflächenspannung steigt und zieht aus den benachbarten, dickeren Filmbereichen Flüssigkeit heran. Löcher werden also äußerst effizient gestopft! Diese Effekte sind für Physiko-Chemiker noch immer schwer im Detail theoretisch greifbar, lassen sich jedoch von Künstlern wunderbar einfangen, unter ihnen der irische Photograph Tim Durham, der sich in Zusammenarbeit mit dem Physiker Stefan Hutzler (Trinity College Dublin) mit viel Leidenschaft diesem Thema gewidmet hat (Abb. auf S. 29).

Die Struktur flüssiger Schäume

Ein Schlüsselparameter für die Charakterisierung eines Schaums ist seine relative Dichte ϕ , d. h. das Verhältnis zwischen dem Volumen der kontinuierlichen Flüssigmatrix, welche die Blasen voneinander trennt, und dem Gesamtvolumen des Schaums. Im „trockenen Limit“ (ϕ sehr klein, Abb. 2) bilden die Blasen von dünnen Filmen getrennte Polyeder mit elegant gekrümmten Oberflächen. Gibt man mehr Flüssigkeit hinzu, run-

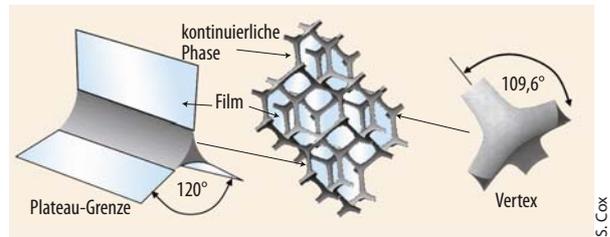


Abb. 2 Strukturgesetze im physikalischen Gleichgewicht für relativ trockene Schäume.

den sich die Blasen zunehmend ab. Schon bei vergleichsweise geringer Dichte ($\phi \approx 30\%$, abhängig von der Größenverteilung der Blasen, Abb. 1) werden die Blasen kugelförmig, und der Schaum erreicht in diesem „nassen Limit“ eine dichte Kugelpackung.

Wie sieht nun aber die detailliertere Struktur solcher Schäume aus? Wie man sich nur unschwer vorstellen kann, ist hier der entscheidende Parameter die Grenzflächenenergie. Denn Wasser/Luft Grenzflächen kommen der Natur teuer zu stehen, und ein Schaum ist voll davon!

Schäume im „trockenen Limit“

In trockenen Schäumen im physikalischen Gleichgewicht führt die Grenzflächenminimierung trotz komplexer Schaumstrukturen zu eleganten und einfachen lokalen Regeln (Abb. 2):

- Der Brite Thomas Young (1773 – 1829) und der Franzose Pierre-Simon Laplace (1749 – 1827) entdeckten, dass benachbarte Blasen mit Druckdifferenz ΔP durch einen dünnen Flüssigkeitsfilm mit Oberflächenspannung 2γ und konstanter mittlerer Krümmung H getrennt sind. Nach dem Young-Laplace-Gesetz gilt

$$\Delta P = 4\gamma H = 2\gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

mit den Hauptkrümmungsradien R_1 und R_2 des Films.

- Der Belgier Joseph Plateau (1801 – 1883) formulierte nach seinen umfangreichen Experimenten grundlegende Gesetze zur Struktur von Schäumen:

- (1) In einer „Plateau-Grenze“ treffen immer drei Seifenfilme aufeinander, und die Winkel zwischen ihnen betragen 120° .
- (2) In einem Vertex treffen immer vier Plateau-Grenzen unter dem „Meraldi-Winkel“ $\arccos(-1/3) \approx 109,6^\circ$ aufeinander und bilden einen tetrahedral symmetrischen Vertex.

Für Schäume mit relativer Dichte von einigen Prozent gelten diese Regeln in guter Näherung, wenn man sich vorstellt, dass die Plateau-Grenzen mit Flüssigkeit „dekoriert“ sind. Diese präzisen Regeln sind jedoch lokal und belassen der Natur eine fast unbegrenzte Vielfalt an Möglichkeiten, eine Anzahl von Blasen zusammenzusetzen (vgl. Abb. 1).

Aus der Suche nach optimalen Blasenarrangements, die nicht nur lokal, sondern auch global die Oberfläche minimieren, entbrannte ein wahrer Wettstreit, der dank moderner Computer noch einmal richtigen Schwung erhalten hat [8]. Eines der populärsten Optimierungsprobleme für unendlich trockene Schäume

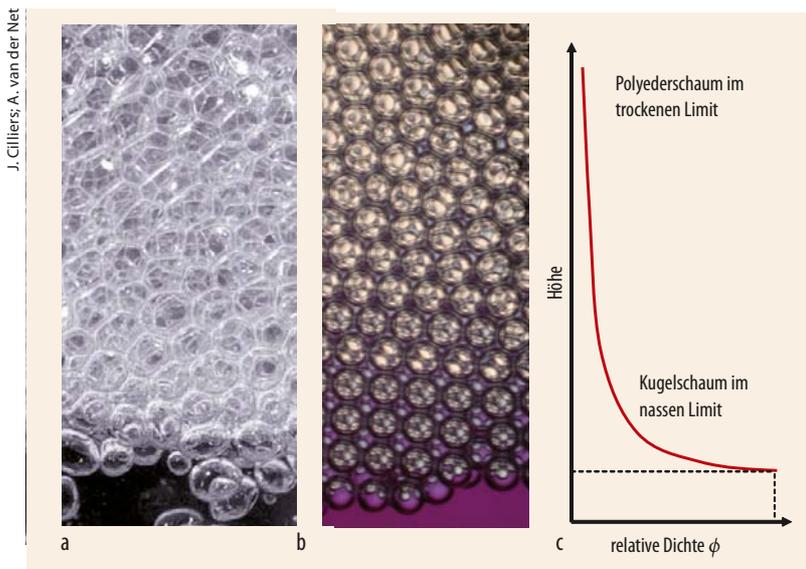


Abb. 1 Im Gegensatz zum „polydispersen“ Schaum (a) enthält „monodisperser“ Schaum ausschließlich Blasen gleichen Volumens, die häufig geordnete Strukturen bilden (b). Ein typisches Beispiel für die höhenabhängige Flüssigkeitsver-

teilung in einem Schaum (c), in dem sich Kapillar- und Schwerkraft im Gleichgewicht befinden. Im „trockenen Limit“ formen die Blasen komplexe Polyeder mit gekrümmten Flächen, während sie im „nassen Limit“ kugelförmig sind.

lässt sich einfach formulieren, hält aber schon viele Generationen von Mathematikern und Physikern in Bann: Wie kann man Zellen gleichen Volumens so zusammenstecken, dass ihre Grenzfläche minimal wird?

Auf zwei Dimensionen reduziert kennen sogar Bienen die Antwort auf diese Frage, denn ihre Larven sind durch die Honigwabenstruktur optimal verpackt. Ein strikter mathematischer Beweis dieser intuitiv einleuchtenden Tatsache musste jedoch lange auf sich warten lassen und wurde erst vor einigen Jahren von Thomas Hales vorgelegt [9]. Die tatsächliche Herausforderung der Bienen ist jedoch noch ein wenig komplizierter, da sie jeweils zwei Wabenschichten zusammenpacken müssen. Die Begeisterung für die Intelligenz der Insekten erfuhr 1964 einen kleinen Dämpfer, als der ungarische Mathematiker Fejes Toth nachweisen konnte, dass die Bienen 0,4 % Wachs sparen könnten, wenn sie die zwei Wabenschichten ein klein wenig mehr gegeneinander verschieben würden [10]. Experimente mit Seifenschäumen retten jedoch den Ruf der Bienen: Befindet sich ausreichend Flüssigkeit zwischen den Blasen, ist die Struktur der Bienen letztendlich doch ideal [11]. Toth hatte als Mathematiker dagegen mit „unendlich trockenen“ Schäumen gerechnet!

Die durch Oberflächenminimierung angetriebene Selbstorganisation von Seifenblasen zeigt sich sehr schön, wenn man Blasen gleicher Volumina in Röhren einführt, deren Durchmesser nur wenigen Blasen-durchmessern entspricht (Abb. 3). Die Blasen organisieren sich in verschiedensten geordneten Strukturen, deren hexagonale Oberflächenstruktur („zylindrische Phyllotaxis“) nicht nur klassischen Beispielen aus der Natur wie Tannenzapfen oder Ananas entspricht, sondern auch den mittlerweile fast bekannteren Kohlenstoff-Nanoröhren.

Auf sehr viel kleineren Längenskalen bahnen sich geordnete Schaumstrukturen derzeit ihren Weg in die „diskrete Mikro- oder Millifluidik“. Fließen diese näm-

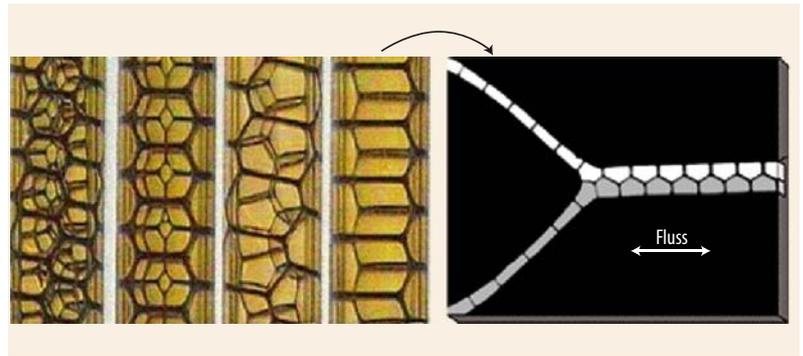


Abb. 3 Die Grenzflächenminimierung ist Motor für die perfekte Organisation von Blasen gleicher Volumina in Röhren. Fließen solche geordneten Schaumstrukturen in kleinen Kanälen, kann man sie für die Entwicklung von „Blasencomputern“ für Lab-on-a-Chip-Technologien verwenden.

lich in speziell geformten Kanälen, ist es möglich, mit den kleinen Gaskammern (oder Tröpfchen, im Fall von Emulsionen) aufgrund ihrer mühelosen Selbstorganisation dank der Grenzflächenminimierung „mathematische Operationen“ auszuführen: Blasen lassen sich hinzufügen, austauschen, entfernen, aufspalten, verschmelzen oder ihre Positionen zueinander verschieben [12]. Fügt man einem solchen „Blasencomputer“ chemische Detektoren hinzu, resultieren intelligente Mikroreaktoren für Lab-on-a-Chip-Technologien.

Richtiger Blasen-Packungskünstler wird man jedoch erst, wenn man ohne zusätzliche Randbedingungen auskommt. Schon Sir William Thomson (später Lord Kelvin) hatte sich der Frage nach der optimalen Struktur von Blasen mit gleichem Volumen bei der Suche nach einer möglichen Struktur des Äthers gewidmet. Er schlug 1887 vor, dass die optimale Anordnung eine bcc-Struktur (body centered cubic) sein könnte. Die Blasen müssen dann „abgeschnittenen Oktahedra“ (Tetraikadehedra) entsprechen (Abb. 4), deren Oberflächen leicht gekrümmt sind, um Plateaus Gesetzen treu zu bleiben. Kelvins Vorschlag blieb für über 100 Jahre ungeschlagen. Erst dank leistungsstarker Computer gelang es 1994 Denis Weaire

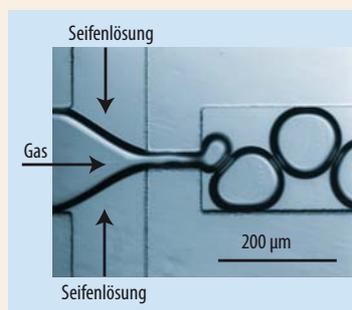
und Robert Phelan am Trinity College Dublin, sich an die Spitze dieses historischen Rennens zu schieben [13]. Ihr Vorschlag (Abb. 4), angelehnt an die „Type I Clathrate Structure“ der Festkörperphysik, besteht aus zwei verschiedenen Zellgeometrien. Er schlug Kelvins Struktur zwar „nur“ um knappe 0,3 %, was jedoch völlig für internationalen Ruhm reichte. Ein strikt mathematischer Beweis, dass dies wirklich die optimale Struktur sein könnte, wird wohl noch lange auf sich warten lassen. Die Welt richtet ihr Auge wieder auf Thomas Hales, doch dieser hat sich bereits fünfzig Jahre dafür erbeten.

Der Natur scheinen die 0,3 % jedoch nicht auszureichen, denn

HERSTELLUNG VON MONODISPERSEN SCHÄUMEN

Die Herstellung von monodispersen Schäumen ist alles andere als schwierig. Für Blasengrößen in der Größenordnung von einigen Millimetern nehme man eine einfache „Düse“, z. B. einen Strohhalm, durch die man mit konstantem Druck (!) in eine Seifenlösung „blubbert“. Die Größe der Blasen lässt sich ein wenig durch den Druck, vor allen Dingen aber durch die Größe der Düse, festlegen.

Um sehr kleine monodisperse Blasen (bis hinunter zu einigen Mikrometern) herzustellen, bedient man sich am besten der Mikrofluidik (Abb. rechts): Gas und Seifenlösung werden gleichzeitig bei konstantem Druck durch eine sehr enge Düse geleitet. Es formt sich ein dünner Gaszylinder, der instabil ist und in extrem monodisperse Blasen „zerbricht“. Unter geeigneten



Bedingungen lassen sich auf diese Weise bis zu einigen tausend Blasen und damit wunderschöne „Blasenkristalle“ (vgl. Abb. 7 oben) pro Sekunde fabrizieren. Schon Bragg hatte solche geordneten Blasenstrukturen verwendet, um die Anordnung der Atome in Festkörpern – und ihre diversen Defekte – zu demonstrieren.

1) Auch wenn beruhigt nicht das richtige Wort ist, da dieser Beweis viele Diskussionen zur Natur der Beweisführung aufgeworfen hat, da Teile mithilfe von Computern ausgeführt wurden. Mehr unter www.math.pitt.edu/articles/cannon/Overview.html

2) Der Schaum erscheint weiß, da die vielen kleinen Blasen das Licht stark streuen.

während man in nicht-theoretischen Schäumen häufig die Kelvin-Zelle findet, ist die Weaire-Phelan-Struktur bisher noch unentdeckt. Wer sie trotzdem in Realität sehen möchte, sollte nach China reisen (Abb. 5).

Schäume im „nassen Limit“

Da Blasen im nassen Limit kugelförmig sind, lässt sich an Grenzflächenenergie nichts mehr einsparen, und die ordnende Kraft wird hier die des Archimedes, welche die Blasen möglichst dicht packen möchte. Konzentrieren wir uns einmal mehr auf monodisperse Schäume, treffen wir wieder auf ein historisches Packungsproblem, dessen erste offizielle Formulierung und Lösungsvorschlag von Johannes Kepler (1571 – 1630) stammen und später das 18. in Hilberts berühmter Liste von 23 ungelösten wichtigen Problemen wurde: Mit welcher Struktur erreicht man die optimale Packungsdichte von gleichgroßen Kugeln? Lange Zeit galt, dass „viele Mathematiker glauben, und alle Physiker wissen“ (Rogers 1958), dass die richtige Antwort die hexagonale Kugelpackung mit einer Dichte von 74,048 % (das heißt $\phi = 25,952$ %) lautet. Die Zweifel der Mathematiker wurden erst 400 Jahre später, im August 1998, (wieder einmal) mit einem von Thomas Hales und Samuel Ferguson vorgelegten Beweis beruhigt.¹⁾ Hexagonale Kugelpackungen gibt es jedoch viele, und ein Schaum scheint sich überraschenderweise – wie der Apfelsinenverkäufer – in den meisten Fällen für die fcc-Struktur (face centered cubic) zu entscheiden. Während im Fall der Apfelsinen ästhetische Argumente für die Strukturwahl ausschlaggebend sind, ist bisher noch immer ungeklärt, welche physikalischen Argumente für Kugelschäume entscheidend sind.

Zwischen den Limits

Was geschieht nun aber, wenn ein monodisperser Schaum weder „völlig trocken“ noch „völlig nass“ ist? Reinhard Höhler von der Universität Marne-la-Vallee in Frankreich hat sich dieser Frage im Detail gewidmet und im Computer simuliert, wie die Grenzflächenenergie vom Feuchtigkeitsgehalt für die fcc- (Kepler) und die bcc-Struktur (Kelvin) abhängt [14]. Wie erwartet, gewinnt im trockenen Limit die bcc- und im feuchten Limit die fcc-Struktur mit einem Übergangs-

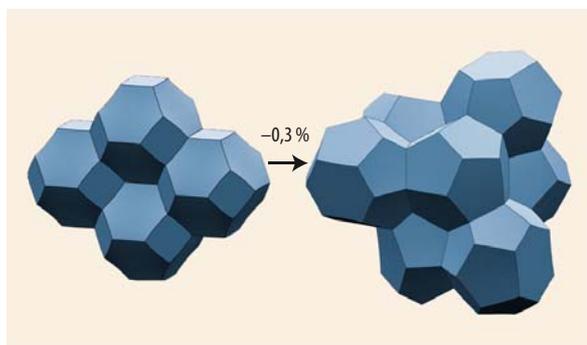


Abb. 4 Die Weaire-Phelan-Struktur (rechts) ist gegenwärtig die optimale Antwort auf die Frage, wie man den dreidimensionalen Raum in gleichgroße Volumina mit minimaler Grenzfläche aufteilen kann. Sie schlägt die von Lord Kelvin vorgeschlagenen bcc-Struktur (links) mit knappen 0,3 %.

bereich, in dem – wie Experimente bestätigen – beide Strukturen koexistieren (Abb. 6). Dabei zeigt sich außerdem: Während die Grenzflächenenergie nur sehr wenig von der Struktur des Schaums abhängt, ändert sie sich dramatisch mit seinem Feuchtigkeitsgehalt. Grund dafür ist die Tatsache, dass der Übergang von kugelförmigen zu polyhedralen Blasen viel Grenzfläche kostet (Abb. 7). Wie viel Arbeit ΠdV man aufwenden muss, um dem Schaum eine infinitesimale Menge an Flüssigkeit dV zu entlocken (was die Grenzfläche um dS vergrößert),

$$-\Pi dV = \gamma dS,$$

definiert den „osmotischen Druck“ Π in Schäumen. Dieser ist hier jedoch nicht entropischen Ursprungs, sondern ein Maß für die elastische Energie, die man in den Schaum einbringt. Neben dem Flüssigkeitsgehalt hängt er von der durchschnittlichen Blasengröße ab und lässt sich in guter Näherung über den gesamten Feuchtigkeitsbereich mit einem empirischen Gesetz beschreiben [14]. Gleiches gilt auch für Emulsionen mit ähnlichen Strukturparametern. Solche Relationen sind sehr hilfreich, um z. B. die Feuchtigkeitsverteilung in einem Schaum im Schwerfeld zu berechnen, in dem sich der hydrostatische und der osmotische Druckabfall im Gleichgewicht befinden müssen (Abb. 1).

Schaumstruktur im Wandel der Zeit

Langsame Biertrinker und Freunde ausgiebigen Badens wissen es: Was als dichter, weißer Schaum beginnt, endet nach einiger Zeit als eine Ansammlung weniger großer Blasen.²⁾ Am Werk ist hier jedoch meist nicht die Zerbrechlichkeit der Blasen, die in Bier- und Badeschäumen nach jahrzehntelanger Optimierung extrem reduziert ist, sondern das „Coarsening“ („Vergrößerung“). Ein Blick auf die Young-Laplace-Gleichung verrät: Blasen mit kleinen Krümmungsradien haben einen höheren internen Druck als ihre weniger gekrümmten Kollegen. Im Allgemeinen haben auch im Schaum (wie für isolierte Blasen) die kleineren Blasen im Mittel stärker gekrümmte Filme. Mit der Zeit leeren sich daher die kleinen Blasen in den großen, und



Abb. 5 Die Schwimmhalle für die Olympischen Spiele 2008 in Peking besteht aus 4500 gigantischen Weaire-Phelan-Blasen. Die Struktur, deren Elementarzelle aus vier Blasen besteht, erleichtert mit ihrer Translationssymmetrie die Arbeit der Konstrukteure und macht die Halle erdbebensicherer.

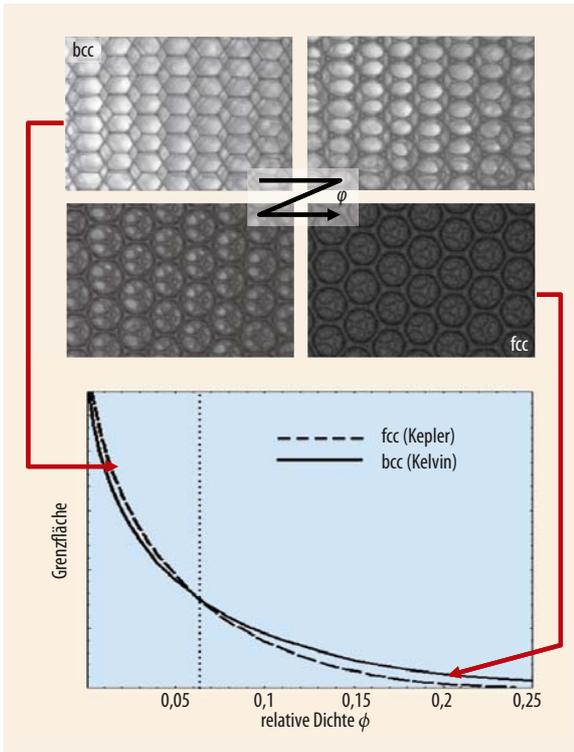


Abb. 6 Fotografien und Grenzfläche von geordneten, monodispersen Schaumstrukturen für zunehmenden Flüssigkeitsgehalt [14]. Im trockenen Limit gewinnt die von Kelvin vorgeschlagene bcc-Struktur, während es im nassen Limit Keplers fcc-Struktur ist.

die durchschnittliche Blasengröße $\langle V \rangle$ nimmt zu. In Schäumen mit geringer Dichte findet man dafür ein einfaches Potenzgesetz

$$\langle V(t) \rangle \sim (t - t_0)^{3/2}.$$

Dieses lässt sich aus einem einfachen Skalierungsargument herleiten [3], das jedoch auf einer Annahme beruht, die Schaumforschern mehrere Jahrzehnte schlaflose Nächte bereitet hat: Nach einem Übergangsstadium, dessen Dauer von der Ausgangsverteilung der Blasen abhängt, ist die Schaumstruktur (statistisch) skaleninvariant, das heißt, es ändert sich nur die durchschnittliche Blasengröße, während die normierte Verteilung der Blasenvolumina (und anderer Strukturparameter) unverändert bleibt. In Monolagen von Schäumen hatte man diese Tatsache relativ leicht nachweisen können, da diese nicht nur für Experimente und Simulationen, sondern auch für die Theorie leichter zugänglich sind (Abb. 8).

Drei Dimensionen sind leider weniger leicht zu handhaben, und die Forschung musste auf effizientere Rechentechniken und schnellere, hochauflösende Bildgebung warten, um sich den „echten“ 3D-Schäumen zu widmen. Denn um sich mit einigen hundert Blasen im „Scaling State“ zu befinden, muss man im Allgemeinen mit einigen hunderttausend beginnen. Französische Forscher haben dazu (unter anderem) ihr berühmtes und sehr stabiles Schokoladenmousse an der Synchrotronstrahlungsquelle in Grenoble untersucht. Sie finden ihre Ergebnisse nicht nur im Einklang mit Monte-Carlo-ähnlichen Simulationen, sondern auch

mit theoretischen Modellen, die im Scaling State eine log-normal-ähnliche Blasengrößenverteilung vorherzusagen [15].

Die intensive Suche nach einem Verständnis für das Coarsening-Verhalten der Schäume ist nicht nur von Biertrinkern motiviert, sondern läuft parallel mit ähnlichen Bemühungen in vielen anderen Bereichen der Physik, in denen die Grenzflächenenergie das Verhalten zellulärer Systeme dominiert [16]. In zwei Dimensionen ist dies z. B. das Verhalten von magnetischen Domänen, während in drei Dimensionen das Korngrößenwachstum von Metallen von Interesse ist.

Rettet die Sahnetorte

Während Physiker sich für das Coarsening flüssiger Schäume begeistern, ist es im Alltag oft unerwünscht. Eine Mousse au Chocolat, das nach einer Woche im Supermarktregal aus einer einzigen großen Blase besteht, lässt sich nur schwer verkaufen. Eine schon lange praktizierte Lösung besteht darin, Gase zu verwenden, die schwer in der Flüssigkeit löslich sind und daher sehr langsam durch die Filme diffundieren. Bekanntestes Beispiel dafür ist sicherlich das Lebenselixier der Iren, das Guinness-Bier, dessen cremiger Schaum Stickstoffblasen enthält und damit Trinkpausen übersteht, die circa 50-mal länger sind als die von CO₂ geschäumten Bieren. (Nicht, dass die Iren lange Trinkpausen bräuchten ...)

Interessanter, und in der Forschung ganz aktuell, ist jedoch eine andere Methode, die man sich von den sog. Pickering-Emulsionen abgeschaut hat und die gleichzeitig mehrere Fliegen mit einer (Nano-)Klappe schlägt. Man kann sich nämlich ganz der Verwendung von Seifenmolekülen zur Schaumstabilisierung entziehen, wenn man oberflächenaktive Festkörper verwendet, deren Größe im Nano- oder Mikrometerbereich liegt [17]. Schon vor einiger Zeit machten „Janus-Partikel“ Furore, die (wie ihr Name bereits andeutet) eine hydrophobe und eine hydrophile Seite

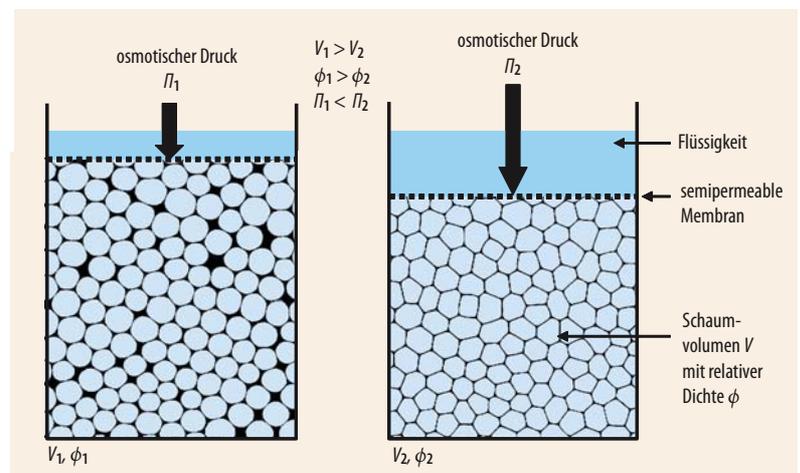


Abb. 7 Um Schäumen Flüssigkeit zu entlocken, muss man die Blasen verformen. Die damit in den Schaum eingebrachte elastische Energie drückt sich im „osmotischen Druck“ aus.

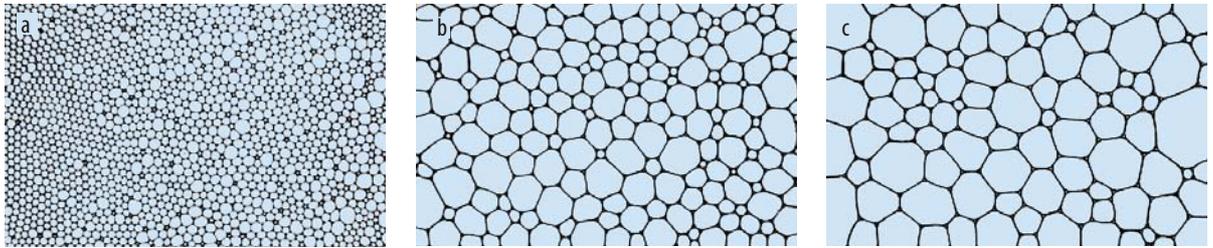


Abb. 8 Coarsening in einem quasi-zweidimensionalen Seifenschaum: Die kleinen Blasen entleeren sich kontinuierlich

in die großen. Nach einer Übergangszeit (a) ändert sich nur noch die durchschnittliche Blasengröße, während die

normierte Blasengrößenverteilung unverändert bleibt (b → c).

haben. Die Herstellung solcher Teilchen ist jedoch aufwändig. Daher widmet man sich zunehmend Teilchen, deren gesamte Oberfläche chemisch so modifiziert ist (z. B. durch Silanisierung), dass die Benetzungsenergie hoch genug ist, damit sich die Teilchen lieber an der Wasser-Luft-Grenzfläche aufhalten. Meist ist dabei die Energieeinsparung im Vergleich zu thermischen Energiefluktuationen so hoch, dass die Teilchen irreversibel an der Oberfläche adsorbiert sind. Von dort aus wechselwirken sie nicht nur mechanisch, sondern meistens auch elektrostatisch und bilden einen extrem stabilen Schutzmantel, der die Blasen vor dem Platzen schützt und auch das Coarsening völlig unterdrücken kann. Blasen oder Flüssigschäume aus solchen Teilchen sind daher über mehrere Monate völlig stabil! Ein durchaus vergleichbarer Effekt rettet unsere Sahnetorten. Denn Schlagsahne enthält feinste Fettkörnchen, die ebenfalls eine extrem stabile Rüstung um die kleinen Bläschen bilden. Das erklärt auch, warum die Sahne vor (und nach) dem Schlagen in den Kühlschrank muss. Denn aus den Fettkörnchen werden sonst Fetttropfchen, die exzellente Antischäumer sind!

Die kontrollierte Entwicklung solcher Antischäumer ist von großem Interesse [18], denn in einer Vielzahl von industriellen Prozessen ist die Erzeugung stabiler Schäume ein eher unerwünschter Nebeneffekt. Klassische Beispiele findet man in der Herstellung von Papier, Glas oder Plastikgegenständen; viel greifbarer jedoch im eigenen Haushalt: Wer schon einmal versucht hat, aus der Not heraus, die Geschirrspülmaschine mit einem Standardpülmittel zu betreiben, wird sich nur ungern daran erinnern, wie schnell man ein ganzes Zimmer mit Schaum ausfüllen kann. Waschpulver enthalten aus diesem Grund neben den schäumenden Substanzen, die zur Reinigung notwen-

dig sind, auch immer Antischäumer wie hydrophobes Pulver, dessen Teilchen effizient die dünnen Filme der Schäume zerstören. Das bisschen Schaum, das wir in unserer Waschmaschine sehen, dient rein der Optik und ist ein von der Industrie intensiv erforschtes Ergebnis des Gleichgewichts zwischen kontinuierlicher Schaumerzeugung und -zerstörung.

Feste und intelligente Schäume

Ein noch effizienteres Mittel gegen das Coarsening besteht darin, den Schaum zu verfestigen, d. h. die flüssige Matrix „einzufrieren“. Damit befindet man sich in der Domäne der festen Schäume oder schaumähnlichen Strukturen, die aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken sind [19]. Zu ihnen gehören natürlich vorkommende Materialien wie Kork oder Knochenmark. Viel präsenter sind mittlerweile jedoch industriell hergestellte Schäume, meist auf Polymerbasis. Diese sind ebenso stabil wie leicht und dienen zur Stoßdämpfung, Wärmedämmung oder akustischen Isolierung. Offenzellige Schäume in Form von Schwämmen bieten riesige nutzbare Oberflächen auf kleinem Raum, z. B. in Katalysatoren. Auch essbare feste Schäume sollte man nicht vergessen. Was wäre schon ein Brot oder ein Kuchen ohne seine Blasen?

Doch obwohl die industrielle Anwendung fester Schäume auf eine lange Entwicklung zurückschaut, ist das Potenzial dieser löchrigen Materie längst nicht ausgereizt. Mit zunehmendem physikalischen, chemischen und technischen Know-how, vor allen Dingen im Mikro- und Nanometerbereich, erschließen wir uns immer neue Schaumgebiete. Wichtige Schlüsselaufgaben sind dabei das Schäumen neuer Materialien (z. B. Glas, Metalle, biologisch abbaubare Materialien oder Dispersionen von Kohlenstoff-Nanoröhren), eine maximale Kontrolle über die Schaumstruktur (Größe und Anordnung der Blasen) oder die Erzeugung „intelligenter Schäume“, deren Eigenschaften sich mithilfe externer Stimuli modifizieren lassen oder die dank beweglicher Polymere selbstheilende Eigenschaften haben.

Besonders Metallschäume sind derzeit groß in Mode (Abb. 9) [20]. Ersetzt man z. B. eine feste Metallplatte durch eine geschäumte Platte desselben Materials, die genauso schwer, aber n -mal so dick ist, erhöht sich dessen Steifigkeit um den gleichen Faktor n . Eine verlockende Aussicht für alle Industriezweige, die nach

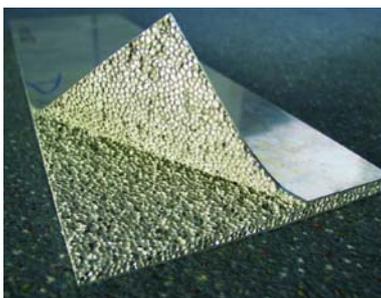


Abb. 9 Beispiele moderner fester Schäume: Metallschaumplatten von Alulight bieten Stabilität trotz Leichtigkeit.

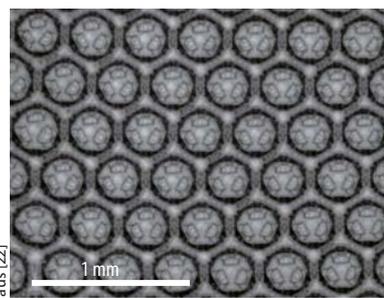
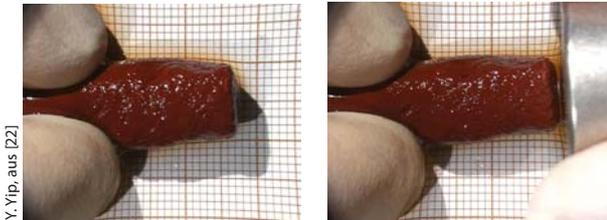


Abb. 10 Die Polymerisierung geordneter Flüssigschäume ermöglicht Materialien mit extrem präzise kontrollierbarer Struktur.



Y. Yip, aus [22]

Abb. 11 Ein Hydrogelschaum (Algenatgel), der Ferrofluide enthält, lässt sich durch ein Magnetfeld verformen.

einem optimalen Verhältnis zwischen Gewicht und Robustheit ihres Produktes suchen – unter ihnen vor allen Dingen der Fahrzeugbau.

Obwohl Benjamin Sosnik den ersten Metallschaum bereits 1943 hergestellt hat, treffen wissenschaftlich-technisches Know-how und kommerzielle Nachfrage erst seit Kurzen so fruchtbar zusammen, dass erste industrielle Serienanfertigungen zu sehen sind. Erste Autos mit geschäumten Metallteilen stellt z. B. Audi (Audi Q7) her. Hier dient die Schaumstruktur jedoch einem anderen Zweck. Im Gegensatz zu Polymerschäumen verformen sich Metallschäume in der Regel plastisch. Um die vielen Stege und Filme im Schaum zu biegen und brechen, muss so viel Energie dissipiert werden, dass die Auswirkungen eines Aufpralls stark reduziert werden und sich die Sicherheit der Passagiere damit deutlich erhöht.

Im Bemühen um die Herstellung von Schäumen mit kontrollierten Blasengrößen und Strukturen wendet man sich unter anderem der Verfestigung in-situ von Flüssigschäumen im Gleichgewicht zu [21, 22], deren Eigenschaften sich, wie in den vorherigen Abschnitten angedeutet, sehr gut modellieren und kontrollieren lassen (**Abb. 10**). Ein äußerst interessanter und lukrativer Teilbereich der Herstellung von Schäumen mit spezifischen Struktureigenschaften befindet sich im Limit extrem kleiner Blasen. Für Porengrößen im Nanometerbereich divergiert nämlich das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen, sodass sich in einigen Gramm Nanoschaum mitunter ganze Fußballfelder an Oberfläche befinden. In der langen Liste der Superlative von Nanoschäumen befindet sich außerdem seine extrem reduzierte Wärmeleitfähigkeit, da die Blasengröße meist unter der mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle liegt.

Den letzten Schliff erhalten feste Schäume, wenn ihre Eigenschaften durch externe Stimuli modulierbar sind (**Abb. 11**) [22]. Andere Möglichkeiten bieten sich im Bereich elektromechanischer Sensoren und Aktoren [23].

Schaumige Aussichten

Wie dieser kleine Einblick in die Welt der Schäume hoffentlich zeigt, sind diese uns im Alltag umgebenden „luftigen Materialien“ alles andere als trivial. Denn aufgrund komplexer Wechselwirkungen gilt auch für Schäume: Das Ganze ist sehr viel mehr als die Summe seiner Teile! Dementsprechend stellen sie uns

Naturwissenschaftler immer wieder vor eine Reihe interessanter Fragestellungen und dienen häufig als Modellsystem für andere Bereiche der Physik, die experimentell schwerer zugänglich, jedoch von ähnlichen Grundprinzipien bestimmt sind. Für Ingenieure und Nahrungsmittelhersteller bieten sie ein scheinbar unerschöpfliches Potenzial interessanter Anwendungen, für das Künstlerrauge wertvolle Inspiration und für Kinder wie für Physiker ein nie langweilig werdendes Spielzeug.

Literatur

- [1] C. V. Boys, Soap Bubbles, Dover, New York (1990)
- [2] C. Isenberg, The Science of Soap Films and Soap Bubbles, Dover, New York (1992)
- [3] D. Weaire und S. Hutzler, The Physics of Foams, Clarendon Press, Oxford (1999)
- [4] S. Perkowitz, Universal Foam, Anchor, New York (2001)
- [5] D. Langevin, Physik Journal, August/September 2004, S. 67
- [6] D. Exerova und P. M. Kruglyakov, Foam and Foam Films – Theory, Experiment, Application, Elsevier, Amsterdam (1998)
- [7] R. Hoehler und S. Cohen-Addad, J. Phys. Condens. Matter **17**, R1041 (2005)
- [8] T. Aste und D. Weaire, The Pursuit of Perfect Packing, 2. Aufl., Taylor and Francis, London (2008)
- [9] T. C. Hales, Disc. Comp. Geom. **25**, 1 (2001)
- [10] M. Fejes-Toth, Bull. Am. Math. Soc., **70**, 461 (1964)
- [11] D. Weaire und R. Phelan, Nature **367**, 123 (1994)
- [12] D. Weaire und W. Drenckhan, Adv. Colloid Interface Sci. **137**, (2008)
- [13] D. Weaire und R. Phelan, Phil. Mag. Lett. **69**, 107 (1994)
- [14] R. Hoehler, Y. Y. C. Sang, E. Lorenceau und S. Cohen-Addad, Langmuir **24**, 418 (2007)
- [15] G. L. Thomas, R. M. C. de Almeida und F. Graner, Phys. Rev. E **74**, 021407 (2006)
- [16] R. D. MacPherson und D. J. Srolovitz, Nature **446**, 1053 (2007)
- [17] B. P. Binks, Physical Chemistry Chemical Physics **9**, 6298 (2007)
- [18] C. A. Miller, Curr. Op. Colloid. Interface. Sci. **13**, 177 (2008)
- [19] J. L. Gibson und M. F. Ashby, Cellular Solids: Structure and Properties, 2. Aufl., Cambridge University Press, Cambridge (1997)
- [20] J. Banhart, Progress in Materials Science **46**, 559 (2001)
- [21] A. Van der Net, A. Gryson, M. Ranft, F. Elias, C. Stubenrauch und W. Drenckhan, Colloids and Surfaces A, doi:10.1016/j.colsurfa.2009.05.010 (2009)
- [22] Y. Yip Cheung Sang, Vers des micromousses stimulables, Dissertation, Université Paris Diderot, Paris 7 (2009)
- [23] S. Bauer-Gogonea und S. Bauer, Physik Journal, April 2003, S. 41

DIE AUTORIN

Wibke Drenckhan studierte Diplomphysik und Mathematik/Physik Lehramt in Rostock. Nach einer Studienpause, in der sie in Berlin für den Schulbuchverlag PAETEC tätig war, beendete sie 2001 ihr Physikstudium mit einem DAAD-Stipendium an der University of Canterbury in Christchurch, Neuseeland. Ihre Suche nach interessanten Themen in der Physik der weichen Materie endete im Land der stabilen Guinness-Schäume. Am Trinity College in Dublin promovierte sie und war dort zwei Jahre Postdoc. Nach einem Jahr als Gastforscherin an der Universität Paris 7 forscht sie nun für die CNRS am Laboratoire de Physique des Solides der Universität Paris-Sud Orsay. In schlaflosen Nächten versucht sie seit fünf Jahren mit ihren Cartoons für das Physik Journal, den Physikern und der Physik ein wenig auf den Zahn zu fühlen.

