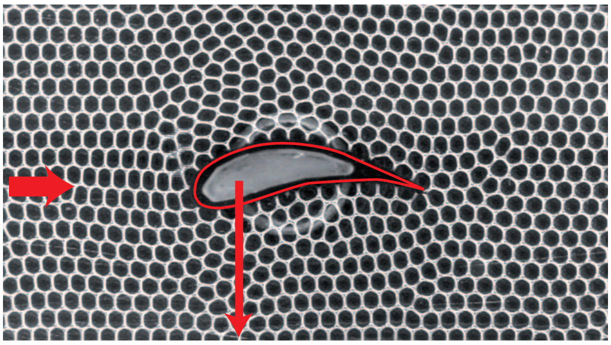
Fliegerkunst im Seifenschaum

Auf die Frage, was Materialien wie Rasierschaum, Mayonnaise, Wandfarbe und flüssiger Zement gemein haben, erhält man im Allgemeinen verdutzte Blicke. Das Röntgenauge des Physikers hat hier jedoch völlige Durchsicht: Alle besitzen eine durch Gasblasen, Tröpfchen, Polymere oder feste Teilchen erzeugte innere Struktur und zählen daher zur Gruppe der „komplexen Fluide".

Wie der Name unzweifelhaft andeutet, ist das physikalische Verhalten solcher Substanzen ziemlich kompliziert. Je nach gegebenen Bedingungen benehmen sie sich mal wie Flüssigkeiten und mal wie Festkörper. Und das ist keinesfalls nur temperaturbedingt, sondern hängt auch von Faktoren wie Deformationsraten oder dem Vorhandensein externer physikalischer Felder ab. Genau diese Vielseitigkeit macht sie jedoch auch so beliebt – in der Natur ebenso wie in der Industrie. Und wie wir aus aktueller Nano-Forschung wissen, verhalten sich selbst gewöhnliche Flüssigkeiten wie komplexe Fluide, sobald die Längenskalen des Systems von der Größe einiger Moleküle sind.



Flugstunden in einem quasi-zweidimensionalen Seifenschaum geben illustrativen Aufschluss über die elastischen Eigenschaften komplexer Fluide. Das von links angeströmte Profil erfährt einen Abtrieb. Die Schwerkraft wirkt senkrecht zur Bildebene.

Obwohl wir von komplexen Fluiden geradezu umgeben sind, erobern wir uns erst allmählich ein theoretisches Verständnis ihrer physikalischen Eigenschaften – und sehen uns in diesem Prozess häufig unserer Intuition beraubt. Wir alle wissen, wie es sich anfühlt, wenn man im Wind steht, ins Wasser springt oder gegen eine Wand läuft. Doch wie wäre es zum Beispiel, durch einen Rasierschaum zu schwimmen? Wer hier denkt, mit der Vorstellung von zähflüssigem Wasser weit zu kommen, hat sich geirrt. Und genau das haben jetzt Physiker in Grenoble in einem wunderbar anschaulichen Experiment verdeutlichen können [1].

Benjamin Dollet und sein Team [2] widmeten sich einem altvertrauten Problem: dem Widerstand und Auftrieb verschiedenster Objekte im Strömungskanal. Doch was in ihrem Experiment strömt ist nicht Luft oder Wasser, sondern eine Kombination aus beidem: ein herkömmlicher Abwaschschaum. Stutzig wurden sie, als sie feststellten, dass das klassische Tragflügelprofil („Joukovski-Profil") in einem solchen System keinen Auftrieb, sondern *Abtrieb* erfährt.

Dieses Phänomen ist ein deutlicher Fingerabdruck der Elastizität, die in den meisten komplexen Fluiden ihr Unwesen treibt. Schäume zählen nämlich zur Gruppe der „visko-elastischen" Flüssigkeiten, da die in ihnen enthaltenen Gasblasen unter Scherung nicht nur gegeneinander reiben (viskos), sondern sich auch gleichzeitig verformen (elastisch). Letzteres wirkt als lokaler Speicher elastischer Energie, was zu internen Spannungen führt, die im Kräftegleichgewicht berücksichtigt werden müssen. In Dolletts Abtriebsproblem geht dies sogar so weit, dass Dissipation und Trägheitskräfte im Vergleich zu den elastischen Beiträgen völlig vernachlässigt werden können. Die Stärke des Abtriebes verändert sich daher kaum mit der Fließgeschwindigkeit des Schaums.

Um das genaue Wirken der elastischen Spannungen zu verstehen, muss man sie sich aufgespalten in ihren *isotropen* und *anisotropen* Anteil vorstellen. Im Allgemeinen sind diese Informationen schwer experimentell zugänglich – nicht jedoch in Dollets Schaumkanal. Hier strömt nämlich ein horizontaler, einlagiger Schaum aus gleich-großen Stickstoff-Seifenblasen gleichmäßig und langsam ($v < 3$ mm/s) zwischen einer Wasseroberfläche und einer Glasplatte um das zu studierende Objekt. Das wiederum ist an einer hochempfindlichen Glasfaser befestigt, deren Auslenkung Aufschluss über die Gesamtkräfte gibt, die an dem Objekt angreifen (hier: Abtrieb = 1,8 ± 0,03 mN)

Doch dieser quasi-zweidimensionale Aufbau gibt sehr viel mehr her als die Gesamtkraft. Die detaillierte Schaumstruktur lässt sich direkt von oben einsehen und mit Hilfe des Computers auswerten. Die beiden Spannungsanteile können damit unabhängig voneinander und vor allen Dingen *rein geometrisch* bestimmt werden:

▶ Die scheinbare zwei-dimensionale Blasengröße gibt quantitativen Aufschluss über die *isotrope Spannung*, die wie ein herkömmlicher Druck wirkt und zur lokalen Kompression des Systems führt. Wo dessen Stärke zunimmt, werden die Blasen senkrecht zur Richtung der Schaumschicht verformt und erscheinen von oben gesehen kleiner. Der quasi-2D Schaum verhält sich daher in diesem System wie eine komprimierbare Flüssigkeit.*) Dollet et al. finden, dass die Blasen auf der konvexen Seite des Tragflügels („oben") stärker zusammengedrückt sind als auf der konkaven („unten"), was wie bei einem herkömmlichen Druckgradienten zu einem Abtrieb führt (hier 1,3 ± 0,2 mN).

▶ Die *anisotropen Spannungen* führen zu einer deutlich sichtbaren Verzerrung der Blasen, deren Seifenfilme aufgrund der Gas/Wasser-Grenzflächenspannung wie ein Netzwerk aus „Federn" mit konstanter Zugkraft wirken. Um die aus der Verzerrung dieses Netzwerks resultierenden Kräfte zu bestimmen, haben Miguel Aubouy und Kollegen [3] den eleganten „Struktur-Tensor" eingeführt, in dem die Richtung und die Länge eines jeden Seifenfilms statistisch berücksichtigt werden. Mit Hilfe des Computers lässt sich daher der anisotrope Spannungsteil direkt aus den Aufnahmen des Experiments berechnen. In der Abbildung erkennt man, dass das Netzwerk aus Seifenfilmen über den konvexen Bereichen des Tragflügels in Flussrichtung, über dem konkaven Bereich jedoch senkrecht zur Flussrichtung verformt ist. Auch dieser Beitrag führt zu einer abwärts gerichteten Gesamtkraft (hier 0,5 ± 0,2 mN). Die Summe beider rein geometrisch ermittelten Spannungsanteile sollte die Gesamtkraft auf den Tragflügel liefern, die mithilfe der Auslenkung der Glasfaser direkt gemessen wird. Und das ist in der Tat der Fall!

Flugstunden im Seifenschaum bieten also ein besonders illustratives Beispiel der elastischen Eigenheiten komplexer Fluide. Und außerdem eine weitere Bestätigung der Tatsache, dass die physikalischen Eigenschaften der Bestandteile eines Systems (Newtonsches Gas und Wasser) nicht unbedingt über die des Gesamtsystems (nicht-Newtonscher Schaum) Aufschluss geben. Das Ganze ist eben deutlich mehr als die Summe seiner Teile.

Wiebke Drenckhan

*) Das ist nicht zu verwechseln mit der Komprimierung des Gases in den Blasen selbst, die unter diesen Drücken vernachlässigbar gering ist.

Dr. Wiebke Drenckhan, Physics Department, Trinity College Dublin, Irland

[1] *B. Dollet, M. Aubouy* und *F. Graner*, Phys. Rev. Lett. **95**, 168303 (2005)

[2] *B. Dollet* et al., Phys. Rev. E **71**, 031403 (2005)

[3] *M. Aubouy* et al., Granular Matter **5**, 67 (2003)

Synchronisierte Fußgänger

Unmittelbar nach der Eröffnung der Millenium Bridge im Sommer 2000 in London strömten Tausende Besucher über die rund 300 m lange, reine Fußgängerbrücke über die Themse (Abb. 1). Zur Überraschung aller versetzten die Fußgänger bei ihrem Spaziergang jedoch die zunächst ruhig in ihren Tragseilen hängende Brücke langsam in transversale Schwingungen, deren Amplitude so groß wurde, dass die Behörden die Brücke zwei Tage später sperrten und eine eingehende Untersuchung anordneten. Ein offensichtlicher Konstruktionsfehler konnte jedoch zunächst nicht entdeckt werden. Was also war geschehen?

Um diese Frage zu beantworten, schauen wir zurück in das Jahr 1665. Der holländische Physiker Christian Huygens beschäftigt sich mit der Konstruktion präziser Pendeluhren, die auch für die Seefahrt geeignet sind. Als er krank im Bett liegt, beobachtet er zwei Uhren, die an der Wand seines Zimmers angebracht sind, und bemerkt, dass sie exakt gegenphasig schwingen. Nun sind seine Uhren zwar echte „Hightech-Produkte“ ihrer Zeit, aber Huygens weiß auch, dass sie nicht so genau übereinstimmen können, um über längere Zeit exakt im Gleichtakt zu bleiben. Schnell findet er jedoch die richtige Erklärung für diese „Sympathie der beiden Uhren“: Die Uhrenschwingungen beeinflussen sich gegenseitig durch kaum wahrnehmbare, durch die Wandbalken übertragenen Schwingungen, was bei hinreichend guter Übereinstimmung der Pendeluhren zu einem Gleichtakt führt. Diese Beschreibung gilt heute als eine der ersten Beobachtungen eines Synchronisationsphänomens in der Physik.

Wie ein Autorenteam um den amerikanischen Mathematiker Steven Strogatz und den Marburger Physiker Bruno Eckhardt jetzt nachgewiesen hat, spielte Synchronisation auch bei den sich aufschaukelnden Oszillationen der Millenium Bridge eine entscheidende Rolle [1]. Wieder sind es kaum wahrnehmbare Einflüsse, die zu dem beobachteten Effekt führen: Zunächst zufällige, kleine Schwankungen der Brücke beeinflussen die Gangart der Fußgänger, die (natürlich unbewusst) ihre Schritte der Brückenschwingung anpassen. Dadurch wird die Brückenschwingung verstärkt, was wiederum dazu führt, dass die Passanten nun umso mehr mit ihrem Gang auf die Oszillationen reagieren. Es entsteht also ein sich selbst verstärkender Kreislauf, durch den am Ende (fast) alle Fußgänger (ohne militärisches Kommando!) im Gleichtakt marschieren und so die Brücke zu gefährlichen Schwingungsamplituden treiben. Ein spontaner Synchronisationsprozess, der, wie Experimente auf der Brücke und das folgende mathematische Modell zeigen, jedoch erst ab einer gewissen kritischen Personenzahl auftritt.

In dem Modell wird die angeregte transversale Schwingungsmode der Brücke (Masse M, Federkonstante K, Dämpfungskonstante B) durch einen schwach gedämpften harmonischen Oszillator beschrieben

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = G \sum_{i=1}^{N} \sin\Theta_i \,, \qquad (1)$$

der von den Schritten der $i = 1, \ldots, N$ Fußgänger durch seitliche (transversale) Kräfte $G\sin(\Theta_i)$ angetrieben wird. Jede Phase $\Theta_i(t)$ nimmt dabei während einer Links-Rechts-Schrittfolge um 2π zu und folgt *ohne* Beeinflussung durch die Brückenschwingungen der Differentialgleichung

$$\dot{\Theta}_i = \Omega_i \qquad (2)$$

mit personenbezogenen, konstanten Gangfrequenzen Ω_i, die gemäß einer Dichte $P(\Omega)$ zufällig verteilt sind. Der entscheidende Schritt besteht nun darin, den Einfluss der Brückenschwingung $x(t) = A(t)\sin\Psi(t)$ auf den Gang und die Zeitentwicklung von $\Theta_i(t)$ zu berücksichtigen. Hierbei sind $A(t)$ die Amplitude, $\Psi(t) = \Omega_0 t + \phi(t)$ die Phase und $\Omega_0 = (K/M)^{1/2}$ die Resonanzfrequenz der Brücke, wobei $A(t)$ und $\phi(t)$ langsam veränderliche Variablen sind. Um die Rückwirkung der Brücke auf den Gang zu erfassen, ergänzen Strogatz et al. jede Phasengleichung (2) mit einem Antriebsterm

$$\dot{\Theta}_i = \Omega_i + CA\sin(\Psi - \Theta_i + \alpha) \,, \qquad (3)$$

der insbesondere von der Differenz der Brückenschwingungsphase $\Psi(t)$ und der Phase $\Theta_i(t)$ des jeweiligen Fußgängers abhängt. Der Parameter C repräsentiert dabei die Empfindlichkeit der Fußgänger gegenüber den Brückenschwingungen#) und α ist eine Phasenverschiebung.

Durch die Wechselwirkung der Differentialgleichung (1) für die Brückenschwingung mit den Bewegungsgleichungen (3) der Fußgänger erhält man ein System gekoppelter Oszillatoren, dessen Verhalten u. a. wesentlich von der Personenzahl N abhängt. Nach der Sperrung der Millenium Bridge wurde die Personenzahl auf der Brücke bei gezielten Experimenten systematisch gesteigert. Dabei zeigte sich, dass die Schwingungen erst ab einer kritischen Anzahl von ca. 150 Fußgängern auftreten. Strogatz et al. gelang es, dieses experimentelle Ergebnis mit Hilfe ihres Modells in einer Simulation zu reproduzieren (Abb. 2). Abb. 2c zeigt als Maß für die Kohärenz der Gangarten den Betrag des komplexen *mittleren* Feldes $R(t) = (1/N)\,\Sigma_{j=1}^{N} \exp(i\Theta_j(t))$, der ebenfalls mit Einsetzen der Synchronisation ansteigt und als Ordnungsparameter aufgefasst werden kann.

#) Der Einfachheit halber wird von gleicher Sensibilität aller Passanten ausgegangen.

Abb. 1:
Die Millenium Bridge in London wurde inzwischen mit Dämpfungselementen ausgestattet, die ein Aufschaukeln verhindern.

Die von den Autoren gewählte Beschreibungsform (3) für die Bewegung der Fußgänger ist inspiriert durch die mathematische Modellierung biologischer Rhythmen, bei denen ebenfalls kohärente Dynamik und Synchronisation auftreten können. Bereits in den 60er-Jahren des 20. Jahrhunderts untersuchte der theoretische Biologe A. Winfree Systeme gekoppelter Oszillatoren, um so z. B. das synchrone Blinken vieler hundert Glühwürmchen in Südostasien zu beschreiben [2]. Auch hier leuchten die einzelnen Würmchen zunächst mit leicht unterschiedlichen, individuellen Frequenzen. Sieht jedoch ein Glüh-