

## Algentanz im Walzertakt

Zilien von Mikroorganismen erzeugen eine nichtlineare Dynamik in zäher Umgebung.

1) Ein von einer Punkt-kraft initiiertes Flussfeld wird allgemein auch Stokeslet genannt.

Leben auf der Mikrometerskala spielt sich vorzugsweise in wässriger Umgebung ab. Diese erscheint bei solchen Längenabmessungen so zäh, dass Trägheit keine Rolle spielt. Ein Mikroorganismus muss daher ständig in Bewegung sein, um sich fortbewegen zu können [1]. In dieser hochviskosen Umgebung sind nichtlineare dynamische Effekte möglich, die durch Strömungsfelder vermittelt werden und die physiologisch relevant sind. So ist ein Pantoffeltierchen mit einem Teppich feinsten Härchen bedeckt [2]. Die Bewegung jedes dieser Härchen, im Fachjargon Zilien genannt, folgt einem dreidimensionalen Schlagmuster. Sie ist koordiniert und führt aufgrund einer kleinen Phasenverschiebung zwischen den Zilien zu Wellen, die entlang der Oberfläche des Pantoffeltierchens laufen. Mit großer Sicherheit steuern nicht intrazelluläre Mechanismen die in den Wellen synchronisierte Schlagbewegung der Zilien, sondern allein die von den Zilien erzeugten Strömungsfelder. Physiologisch interessant sind diese Wellen, weil sie die Fließgeschwindigkeit der Strömungsfelder verglichen mit in Phase schlagenden Zilien signifikant erhöhen [3].

In einer aktuellen Arbeit berichten die Gruppen um Raymond Goldstein und Timothy Pedley aus Cambridge über ein anderes sehr schönes biologisches Beispiel für kollektive Dynamik, die durch Strömungsfelder entsteht [4]. In einer Suspension von Volvox-Algen beobachten sie Algenpaare, die sich nahe von Oberflächen wie im Walzer umeinander drehen (Abb. 1, 2)

Abb. 2 Schwimmt die Alge gegen eine obere Berandung, bildet sich durch die Zilienschläge ein Strömungsfeld aus: (a) von der Seite, (b) von oben gesehen.

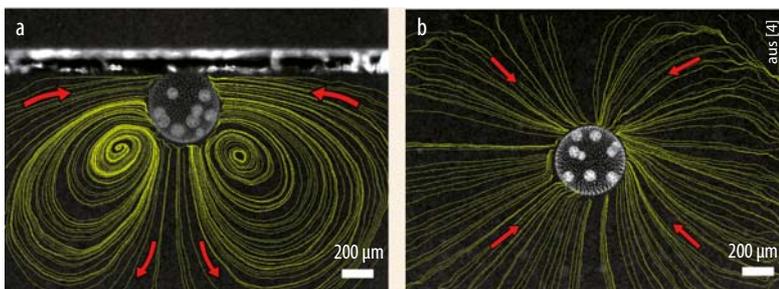


Abb. 1 Die Frischwasseralge Volvox tanzt mit einem Partner eine Art Walzer (von oben gesehen). Die Bilder, im zeitlichen

Abstand von vier Sekunden aufgenommen, wurden mit reduzierter Intensität überlagert.

oder wie beim Menuett abwechselnd nach links und rechts aneinander vorbei tanzen (Abb. 3). Diese hydrodynamisch eng „gebundenen Zustände“, die sich in der Natur nahe von Wasser-Luft-Grenzflächen ausbilden würden, sollen die Wahrscheinlichkeit der Befruchtung während der Fortpflanzungsphase erhöhen, so vermuten die Autoren.

Die grüne Alge Volvox besteht aus tausenden von Zellen mit je zwei Zilien und besitzt eine kugelförmige Gestalt mit einem Radius von mehreren hundert Mikrometern. Wie beim Pantoffeltierchen sind die Zilienschläge koordiniert und erzeugen eine Rotation der Alge um eine ausgezeichnete Richtung mit einer Winkelgeschwindigkeit von etwa 1 rad/s bei einem Radius von 150 µm. Zudem schwimmt die Alge dann mit einer Geschwin-

digkeit von 200 µm/s entlang der Vorzugsachse. Im Inneren der Alge sammeln sich Tochterkolonien von Zellen am „hinteren“ Ende der Vorzugsachse, sodass die Alge sich im Schwerefeld vertikal ausrichtet und tendenziell nach oben schwimmt.

Die Autoren lassen Algen in der Versuchskammer gegen eine horizontale obere Berandung – ein Glasplättchen – schwimmen und beobachten dabei den Walzertanz eines Algenpaares (Abb. 1). Dass die Algen sich umeinander drehen, erklärt sich durch ihre Eigenrotation sofort, dass sie aber Paare bilden, zunächst nicht. Abb. 2 gibt das Strömungsfeld um eine Alge wieder, die an der oberen Berandung zum Stillstand gekommen ist. Die roten Pfeile verdeutlichen, wie die Flüssigkeit in der Nähe des Glasplättchens auf die Alge zufließt. Dabei kann es eine andere Alge mitnehmen und ein Paar bilden. In einfachster Näherung repräsentieren die Autoren die Algen durch vertikal ausgerichtete Punktkräfte, die nach unten zeigen. Nahe einer Oberfläche, an der als Randbedingung die Flüssigkeit haftet, erzeugen sie die in Abb. 2 gezeigten Strömungsfelder.<sup>1)</sup> Damit können die Autoren die Annäherung der Algen, die zum „gebun-

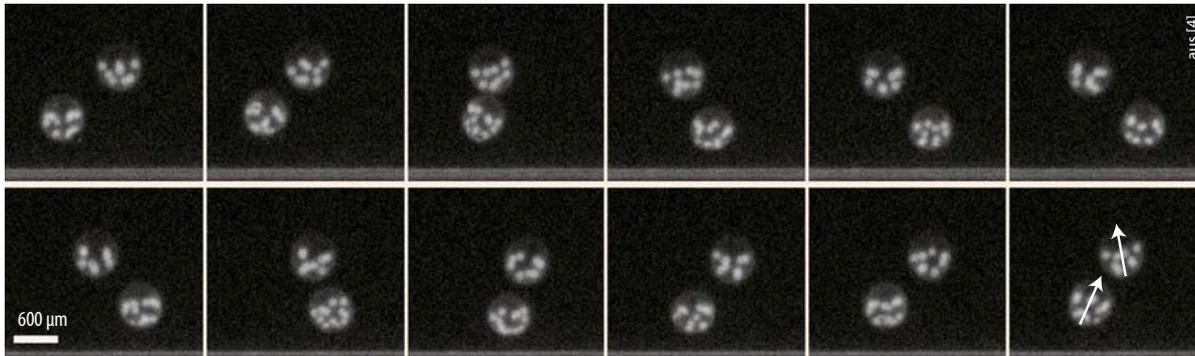


Abb. 3 Menuett-Tanz eines Algenpaares nahe der unteren Berandung der Ver-

suchskammer, von der Seite gesehen. Die Bilder wurden im Abstand von drei

Sekunden aufgenommen. Die Pfeile geben die Richtung der Vorzugsachsen an.

denen Zustand“ führt, quantitativ beschreiben und zeigen, dass der reskalierte Abstand  $r(t)$  der Algen einer nichtlinearen Differentialgleichung genügt:

$$dr/dt = -3r / [\pi(4+r^2)^{5/2}].$$

Ihre Lösung stimmt gut mit dem Experiment überein.

Werden die Algen so schwer, dass die nach oben gerichtete Schwimmbewegung gerade ihre Gewichtskraft kompensiert, so können sie nahe des Bodens der Versuchskammer übereinander schweben. In diesem Zustand oszillieren die Algen auf horizontaler Ebene aneinander vorbei (Abb. 3).<sup>2)</sup> Jede Alge ist nahe der Oberfläche von einem Strömungsfeld umgeben, das aus den Darstellungen in Abb. 2 resultiert, wenn man es an der Horizontalen spiegelt und die roten Pfeile umkehrt. Die Wirbel in Abb. 2a sorgen dafür, dass sich die Vorzugsachsen der Algen aus der Vertikalen herausdrehen. Dadurch gewinnen die Algen eine horizontale Schwimmkomponente, die sie auseinander treibt. Da die Masse in einer Alge unsymmetrisch verteilt ist, existiert aber auch ein Drehmoment, das die Vorzugsachsen innerhalb einer Relaxationszeit  $\tau$  wieder aufstellt. Das entspricht dem Umkehrpunkt der Oszillation. Durch die Wirbel im Strömungsfeld kippen die Vorzugsachsen wieder gegeneinander, sodass die Algen nun in umgekehrter Richtung aneinander vorbeigleiten.

Die Autoren untersuchen die nichtlineare Dynamik des Menuett tanzenden Algenpaares wieder mithilfe von Strömungsfeldern, die durch Punktkräfte erzeugt wer-

den. Für kleine Relaxationszeiten  $\tau$  der Vorzugsachsen ist derjenige Zustand stabil, bei dem die Algen entlang der Vertikalen übereinander schweben. Er gilt somit als Fixpunkt. Drehen die Strömungswirbel die Vorzugsachsen aus der Vertikalen heraus, relaxieren die Achsen schnell in ihre Ausgangslage zurück, bevor die Algen sich fortbewegen. Erhöht man jedoch die Relaxationszeit  $\tau$ , können die Algen sich voneinander entfernen, sodass sich mittels einer Bifurkation der oszillatorische Zustand einstellt. Er bildet einen Grenzyklus der nichtlinearen Dynamik des Algenpaares.

Die Biologie bedient sich einfacher Modellorganismen, um bestimmte Teilgebiete zu studieren; in der Genetik ist es z. B. die Taufliege *Drosophila*. Die Frischwasseralge *Volvox* ist wegen ihrer einfachen kugelförmigen Gestalt ein idealer Organismus, um fluiddynamische Phänomene zu untersuchen. Im

Gegensatz zu passiven Kolloiden zählt *Volvox* dank seines Eigenantriebs zu den aktiven Teilchen. Diese Eigenschaft bestimmt maßgeblich die hier besprochenen hydrodynamischen Zustände, die als modellhafte Beispiele für nichtlineare Dynamik in hochviskoser Umgebung dienen. Auch die kollektive Dynamik und die Ausbildung großskaliger Strukturen in einer Suspension von vielen aktiven Teilchen [5] lässt sich mithilfe der Frischwasseralge *Volvox* modellieren.

Holger Stark

- [1] H. Stark, *Physik Journal*, November 2007, S. 31
- [2] D. Bray, *Cell Movements: From Molecules to Motility*, 2nd ed., Garland Publishing, New York (2001)
- [3] E. M. Gauger, M. T. Downton und H. Stark, *Eur. Phys. J. E* **28**, 231 (2009)
- [4] K. Drescher, K. C. Leptos, I. Tuval, T. Ishikawa, T. J. Pedley und R. Goldstein, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 168101 (2009)
- [5] I. H. Riedel, K. Kruse und J. Howard, *Science* **309**, 300 (2005)

Prof. Dr. Holger Stark, Technische Universität Berlin, Institut für Theoretische Physik, Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin

## KURZGEFASST

### ■ Doping für die Supraleitung

Bei sehr tiefen Temperaturen werden alle Elemente supraleitend. Alle? Fast alle, zumindest unter sehr hohem Druck. Insbesondere Element-Halbleiter, die erst nach Dotierung mit Fremdatomen überhaupt leiten, haben sich bislang bei Atmosphärendruck als hartnäckig erwiesen. Doch nach Silizium und Kohlenstoff (als Diamant) musste sich nun auch Germanium geschlagen geben: Am Forschungszentrum Dresden-Rossendorf ist es gelungen, Ge so stark mit Gallium zu dotieren (bis zu 8 % Ga), dass eine 60 nm dicke Halbleiterschicht bei 0,5 K supraleitend wurde. Supraleitende Halbleiter könnten z. B. für Schaltkreise von Quantencomputern dienen. T. Herrmannsdörfer et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 217003 (2009)

### ■ Finetuning für die Energielücke

Die Energielücke zwischen Leitungs- und Valenzband bestimmt wesentlich den Elektronentransport und die optischen Eigenschaften von Halbleitern und Isolatoren. Nun haben Forscher aus Berkeley (USA) die Energielücke in einer Doppelschicht aus Graphen gezielt verstimmert, indem sie bei Raumtemperatur eine veränderliche Spannung an die Gate-Elektroden eines Doppelschicht-Graphen-Feldeffekt-Transistors legten. Üblicherweise legen Kristallstruktur und chemische Zusammensetzung die Energielücke fest. Dank der einstellbaren Energielücke ist Graphen – normalerweise ein Leiter – ein überaus vielversprechendes Material für elektronische und optische Bauelemente. Y. Zhang et al., *Nature* **459**, 820 (2009)

2) Ein eindrucksvoller Film dieser Bewegungsform ist unter [www.youtube.com/Goldsteinlab](http://www.youtube.com/Goldsteinlab) zu sehen.