

## Zähe Schwimmer

Mikroorganismen können durch ihre Bewegung die Zähigkeit einer Flüssigkeit verändern.

1) Rheologie ist die Lehre vom Fließ- und Deformationsverhalten von Materie.

In seinem „annus mirabilis“ veröffentlichte Albert Einstein nicht nur seine Spezielle Relativitätstheorie und die Erklärung des photoelektrischen Effektes, er legte auch eine Arbeit zur Brownschen Bewegung von in „ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“ vor [1]. Sie lieferte einen bedeutenden Beitrag zur statistischen Mechanik und zur Kolloidphysik. Ein Jahr später, 1906, folgte dann eine weitere viel beachtete Arbeit, in der es eigentlich um eine alternative Bestimmung der Avogadro-Konstante geht. Darin legte Einstein ein passantes die Grundlagen zur Rheologie<sup>1)</sup> verdünnter Kolloidsuspensionen [2]. Die gelösten, Mikrometer großen „Brownschen“ Teilchen beeinflussen die Scherströmung in einer zähen Flüssigkeit, woraus Einstein eine effektive Zähigkeit der Kolloidsuspension berechnete:

$$\eta_{\text{eff}} = \eta (1 + 2,5 \varphi).$$

Hierbei bezeichnen  $\varphi$  das relative Volumen der Kolloide am Gesamtvolumen („Volumenbruch“) und  $\eta$  die Zähigkeit des Lösungsmittels. Dieses Resultat hat Generationen von Kolloidforschern begleitet.

Normalerweise sind die Brownschen Teilchen passiv und lassen sich ohne äußere Kräfte im Strömungsfeld des Lösungsmittels treiben. In letzter Zeit sind jedoch auch aktive Brownsche Teilchen ins Blickfeld der Forschung gerückt. Sie konsumieren z. B. chemische Energie und bewegen sich ohne Einwirkung äußerer Kräfte fort. Mikroorganismen in der Natur sind dafür Paradebeispiele. Das Interesse für ihre Antriebsmechanismen folgt auch aus der Faszination, künstliche, Mikrometer große Schwimmer zu konstruieren.

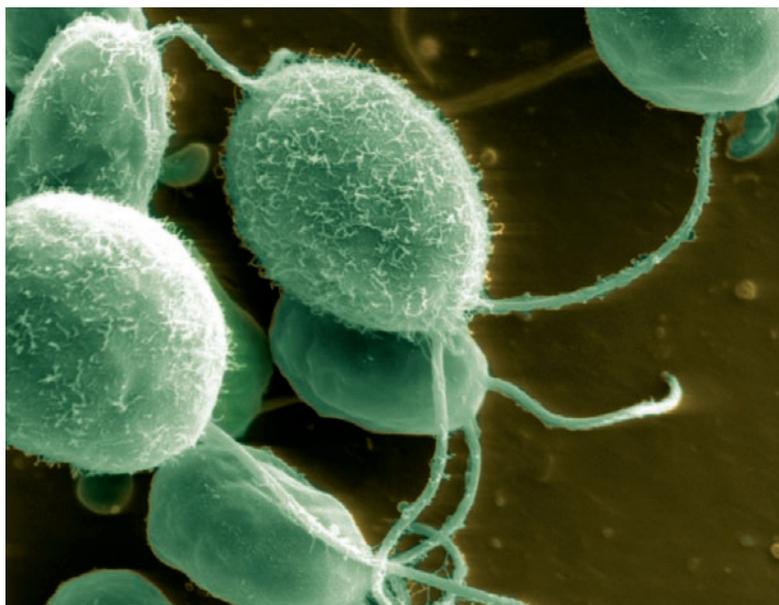


Abb. 1 Die Algen der Gattung *Chlamydomonas* bewegen sich im Wasser mit

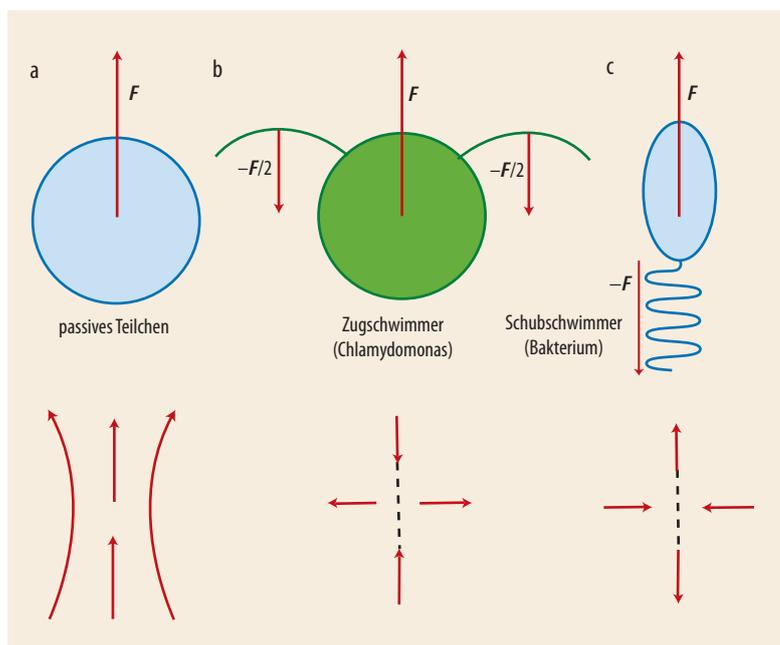
einer Art Brustschlag ihrer beiden Geißeln fort.

mungsfeld des Lösungsmittels treiben. In letzter Zeit sind jedoch auch aktive Brownsche Teilchen ins Blickfeld der Forschung gerückt. Sie konsumieren z. B. chemische Energie und bewegen sich ohne Einwirkung äußerer Kräfte fort. Mikroorganismen in der Natur sind dafür Paradebeispiele. Das Interesse für ihre Antriebsmechanismen folgt auch aus der Faszination, künstliche, Mikrometer große Schwimmer zu konstruieren.

Aktive Teilchen erzeugen um sich herum ein charakteristisches Strömungsfeld. Indische Forscher haben 2004 berechnet, dass dadurch die effektive Zähigkeit einer Suspension aktiver Teilchen maßgeblich von der Einstein-Formel abweichen sollte [3]. Zugschwimmer (engl.: „puller“), die sich mit einer Art Brustschlag durch die Flüssigkeit ziehen, erhöhen demnach die Zähigkeit, während Schubschwimmer („pusher“) diese reduzieren.

Genau ein solches Verhalten konnten nun zwei Forschergruppen verifizieren. Französische Kollegen um Philippe Peyla haben Suspensionen von *Chlamydomonas*, einer Gattung einzelliger Grünalgen, untersucht [4]. Diese bewegen sich mithilfe zweier Geißeln fort, die am kugelförmigen Zellkörper angeheftet sind (Abb. 1). Es zeigt sich, dass die effektive Zähigkeit von Suspensionen lebender Zellen höher ausfällt als von toten. Für kleine Volumenbrüche messen die Forscher einen deutlich erhöhten Vorfaktor 4,5 im Vergleich zu 2,5 in der Einstein-Formel. Dagegen untersuchen Andrey Sokolov und Igor Aranson eine Suspension von Bakterien, die durch rotierende schraubenförmige Geißeln eine Schubkraft erfahren,

Abb. 2 Auf ein passives Teilchen muss eine äußere Kraft  $F$  wirken, damit es sich bewegt (a). Zug- (b) und Schubschwimmer (c) verdanken ihren Antrieb einem Kraftdipol. Unten sind jeweils (sehr vereinfacht) die Richtungen der induzierten Strömungsfelder im Fernfeld gezeigt.



und beobachten eine deutliche Reduktion der effektiven Zähigkeit [5].

Ein passives Teilchen, auf das eine Kraft  $F$  von außen wirkt, überträgt diese über seine Oberfläche auf die umgebende Flüssigkeit. Dadurch wird ein Strömungsfeld initiiert, das im Fernfeld mit dem inversen Abstand  $r^{-1}$  abfällt und das grob in die Richtung der Kraft zeigt (Abb. 2a). Ein aktives Teilchen oder ein Schwimmer bewegen sich ohne Einwirkung äußerer Kräfte. Im einfachsten Fall wirken sie daher mit einem Kraftdipol bestehend aus  $F$  und  $-F$  auf die umgebende Flüssigkeit. Beim Zugschwimmer *Chlamydomonas* treiben die an der Vorderseite des Zellkörpers angehefteten beiden Geißeln die Flüssigkeit im Transportschlag jeweils mit einer Kraft  $-F/2$  nach unten, während der Zellkörper die Flüssigkeit mit  $F$  nach oben schiebt (Abb. 2b). Daraus resultiert ein Strömungsfeld, das mit  $r^{-2}$  abfällt. Es ist entlang der Vorzugsachse auf den Schwimmer gerichtet, während es ansonsten wegen der Massenerhaltung seitlich von ihm wegzeigt (Abb. 2b unten). Für den Schubschwimmer dreht sich das Strömungsfeld gerade um (Abb. 2c). Im Bakterium wird durch ein Bündel von hinten angehefteten, rotierenden Geißeln die Flüssigkeit mit der Kraft  $-F$  nach hinten weggedrückt. Dadurch entsteht

eine Schubkraft  $F$  auf den Zellkörper, der die Flüssigkeit nach vorne mitnimmt.

Wieso nun beeinflussen aktive Teilchen die effektive Viskosität einer Suspension? Das lässt sich verstehen, wenn man Zug- und Schubschwimmer mit einer festen Orientierung in ein schematisch dargestelltes Scherfeld hineinlegt (Abb. 3). Deutlich ist zu erkennen, dass das vom Zugschwimmer initiierte Strömungsfeld der aufgetragenen Scherströmung entgegenwirkt und damit die Scherung erschwert. Dies erklärt die vorhergesagte und in den Experimenten gemessene Erhöhung der effektiven Zähigkeit. Der Schubschwimmer dagegen unterstützt die Scherung und reduziert daher die effektive Zähigkeit.

Nähmen die Schwimmer alle Richtungen im Scherfluss ein, würde sich ihr Einfluss auf die effektive Zähigkeit herausmitteln. Bleibt also zu klären, warum die Schwimmer eine bestimmte Orientierung bevorzugen sollten. Das Bakterium als Schubschwimmer kann man als Stäbchen annähern. Ein lineares Scherfeld lässt sich in ein Wirbelfeld und einen reinen Dehnfluss entlang der Diagonalen zerlegen. Die resultierende Orientierung des Stäbchens ergibt sich dann als Kompromiss zwischen der Rotation

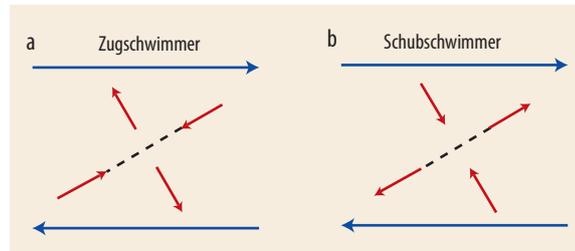


Abb. 3 Ein Zugschwimmer widersetzt sich mit dem von ihm initiierten Strömungsfeld einer Scherströmung (a), während ein Schubschwimmer es unterstützt (b).

und der Ausrichtung im Dehnfluss. Die Alge *Chlamydomonas* besitzt allerdings einen annähernd kugelförmigen Zellkörper, der sich nicht allein in einem Scherfluss ausrichten kann, sondern konstant rotieren sollte. Trotzdem beobachten die Forscher um P. Peyla eine grobe einheitliche Orientierung der Algen, die noch nicht verstanden ist. Die Autoren nennen als mögliche Erklärung, dass die angehefteten Geißeln die Alge zu einem effektiv stäbchenförmigen Objekt machen.

Die Rheologie komplexer Flüssigkeiten, also ihre Fließfähigkeit, ist technologisch und im alltäglichen Leben sehr wichtig. Man denke nur an die Streichfähigkeit einer Malerfarbe oder von Margarine. Das Verständnis einer Suspension von aktiven Schwimmern erfordert spannende neue Physik, die über Methoden der traditionellen Kolloidforschung hinausgeht. In der Anwendung kann man sich ein intelligentes Material vorstellen, dessen Zähigkeit durch die Beweglichkeit der Schwimmer kontrolliert wird. Umgekehrt sollte die effektive Zähigkeit einer Suspension von Spermien Auskunft über deren Beweglichkeit und damit die Zeugungsfähigkeit geben.

Holger Stark

## KURZGEFASST

### ■ Element 117 erzeugt

Einer Kollaboration russischer und US-amerikanischer Wissenschaftler ist es gelungen, durch Beschuss eines Berkeleium-249-Targets mit einem intensiven Kalzium-48-Strahl erstmals Atomkerne des Elements mit der Ordnungszahl 117 zu erzeugen. Während der 70-tägigen Versuchsdauer gingen ihnen insgesamt elf neue, neutronenreiche Isotope ins Netz, darunter fünf Kerne von  $^{293}117$  und einer von  $^{294}117$ . Der Fund am Joint Institute of Nuclear Research in Dubna (JINR) schließt zum einen die bislang bestandene Lücke zwischen den Elementen 116 und 118 und bringt die Forscher zum anderen näher an die „Insel der Stabilität“ heran, die aus recht langlebigen superschweren Elementen bestehen soll.  
Yu. Ts. Oganessian et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 142502 (2010)

### ■ Neuer Hochtemperatur-Supraleiter

Eine Gruppe japanischer Forscher um Ryoji Mitsuhashi von der Universität Okayama hat den ersten Vertreter einer neuen Klasse organischer Hochtemperatur-Supraleiter seit einem Jahrzehnt entdeckt. Dazu leiteten sie Kaliumdampf über einen Kristall aus Pizen ( $C_{22}H_{14}$ ), einem ebenen Molekül aus fünf, an den Kanten verbundenen Benzolringen. Das Alkalimetall zwängte sich in die Gitterzwischenräume und gab Elektronen an den Kohlenwasserstoff ab. Der dadurch entstandene Supraleiter weist eine Sprungtemperatur von bis zu 18 K auf und ähnelt somit metalldotierten Buckminsterfullerenen. Dies lässt ähnliches Verhalten bei weiteren Molekülen erwarten, die mit dem Pizen verwandt sind.  
R. Mitsuhashi et al., Nature **464**, 76 (2010)

- [1] A. Einstein, Ann. Physik **17**, 549 (1905)
- [2] A. Einstein, Ann. Physik **19**, 289 (1906)
- [3] Y. Hatwalne, S. Ramaswamy, M. Rao und R. A. Simha, Phys. Rev. Lett. **92**, 118101 (2004)
- [4] S. Rafaï, L. Jibuti und P. Peyla, Phys. Rev. Lett. **104**, 098102 (2010)
- [5] A. Sokolov und I. S. Aranson, Phys. Rev. Lett. **103**, 148101 (2009)

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