

Die ungewöhnlichen Eigenschaften aktiver Fluide lassen sich mithilfe von Bakterien untersuchen und charakterisieren.

Alex Socha / Pixabay

## HYDRODYNAMIK

# Die Physik aktiver Fluide

**Aktive Fluide zeigen überraschende Eigenschaften vom Strömungsverhalten bis zur Strukturbildung.**

Michael Wilczek, Sebastian Heidenreich und Markus Bär

Aktive Fluide bestehen aus vielen wechselwirkenden Teilchen, die Energie dissipieren und sich eigenständig fortbewegen können. Die Untersuchung dieser Systeme hat ein spannendes Feld der Physik fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht mit völlig neuartigen Phänomenen und Anwendungsfeldern eröffnet.

**W**ir alle kennen die Eigenschaften einer Flüssigkeit aus dem Alltag: Beim Umrühren beginnt sie zu strömen und erzeugt ein meist recht komplexes Bewegungsmuster. Dieses lässt sich mithilfe der Reynolds-Zahl charakterisieren, welche das Verhältnis von Geschwin-

digkeit und Längenskala der Strömung zur Viskosität angibt. Bei kleinen Reynolds-Zahlen ist die Strömung meist laminar, bei hohen komplex und turbulent. Turbulente Strömungen treten beispielsweise in der Atmosphäre oder in den Ozeanen auf, wo sie maßgeblich dazu beitragen, Wärme zu verteilen und mit der Strömung transportierte Stoffe zu mischen.

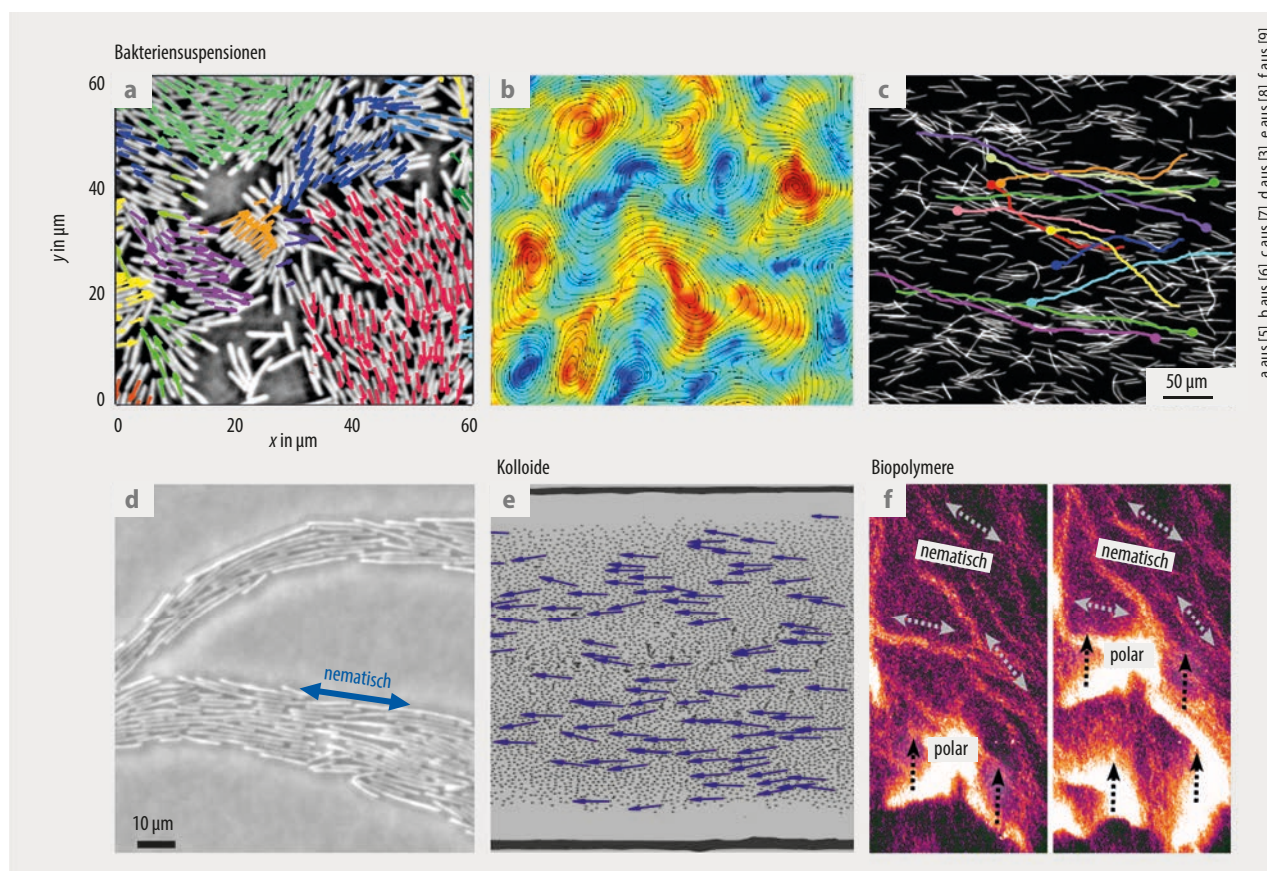
In den vergangenen Jahrzehnten sind aber auch auf der Mikroskala komplexe Strömungsmuster entdeckt worden. So transportieren Strömungen in Zellen biochemische Stoffe. Zudem zeigen Suspensionen von Mikroorganismen – z. B. Bakterien – Strömungsmuster,

die an Turbulenz erinnern. Das überrascht zunächst, da die Reynolds-Zahl auf der Mikroskala äußerst klein ist. Bei genauerem Hinsehen handelt es sich jedoch bei den genannten Beispielen nicht um eine Flüssigkeit im klassischen Sinne, sondern um ein aktives Fluid. Denn viele aktive, mikroskopisch kleine Makromoleküle oder Lebewesen „verrühren“ die Flüssigkeit lokal. Die vielen wechselwirkenden Teilchen eines aktiven Fluids können die chemisch oder biologisch zur Verfügung gestellte Energie zur eigenständigen Fortbewegung nutzen. Makroskopische Strömungen treten auf, wenn viele aktive Teilchen sich durch kollektive Wechselwirkungen zumindest lokal in dieselbe Lage ausrichten.

Im physikalischen Sinne handelt es sich sowohl bei klassischen strömenden Fluiden als auch bei aktiven Fluiden um Systeme fernab des thermodynamischen Gleichgewichts. Klassische Fluide werden durch äußere Kräfte aus dem Gleichgewicht getrieben, während bei aktiven Fluiden die aktiven Teilchen selbst dafür verantwortlich sind. Damit gehören aktive Fluide zum großen Gebiet der aktiven Materie, dessen Erforschung in den vergangenen Jahrzehnten große Aufmerksamkeit erlangt hat [1, 2]. Vogelschwärme oder große Menschenmengen gehören zu den bekanntesten Beispielen, die aber nur schwer unter kontrollierten Bedingungen zugänglich sind.

Aktive Fluide hingegen lassen sich sehr gut im Labor erforschen und zeigen zahlreiche interessante Effekte wie Turbulenz oder Phasentrennung, die zunächst an klassische Flüssigkeiten erinnern. Die Mechanismen, die dieses Verhalten hervorbringen, unterscheiden sich jedoch grundsätzlich von denjenigen in klassischen Fluiden. Zudem gibt es Phänomene, die bei klassischen Flüssigkeiten nicht auftreten wie spontanes Fließen, selbstorganisierte Wirbel oder eine Reduktion der Viskosität durch Aktivität.

Die Erforschung aktiver Fluide ist für viele wissenschaftliche Disziplinen von großer Bedeutung. Ein zentrales Ziel ist hierbei, strukturbildende Prozesse in biologischen Systemen besser zu verstehen. Doch die Paradigmen von Strukturbildung in Flüssigkeiten und chemischen Reaktionen, die durch äußere Einflüsse wie Temperatur- oder Druckgradienten entstehen, sind in lebenden Systemen nur selten anwendbar. Stattdessen treibt die lokale Umwandlung von chemischer in mechanische Energie viele strukturierende Prozesse in biologischen Systemen. Die Anwendungsfelder reichen von der Zell- über die Entwicklungsbiologie bis zur Tumorforschung. Gleichzeitig erhoffen sich die Materialwissenschaften durch die Erforschung aktiver Fluide neue Ideen und Ansätze, um innovative Materialien zu entwickeln. Der folgende Überblick zeigt die ungewöhnliche Physik aktiver Fluide mit zahlreichen neuen Phänomenen.



**Abb. 1** In aktiven Fluiden treten dynamische Muster auf: Polare Cluster (Schwärme) des Bakteriums *Bacillus subtilis* entstehen durch die Wechselwirkung untereinander und aus Bewegung (a). Die Mesoskalenturbulenz von *Bacillus subtilis* ist visualisiert durch die Wirbelstärke (b), wobei rot der Rotation gegen den Uhrzeigersinn entspricht, blau im Uhrzeigersinn. Kolibakterien zeigen globale nematische Ordnung (c), wobei entgegengesetzte Bewegung durch farbige Trajektorien dargestellt ist. *Paenibacillus dendritiformis* bilden ein nematisches Band (d), aktive Kolloide eine globale polare Ordnung (e), und in aktiven Biopolymeren koexistieren polare Cluster und nematische Bänder (f).

## Suspensionen von Bakterien als aktive Fluide

Als eine der ersten Lebensformen unserer Erde haben sich Bakterien weit verbreitet. Allein im Körper eines Menschen befinden sich weit mehr Bakterien als körpereigene Zellen. Auch für die Erforschung aktiver Fluide spielen Bakterien eine wichtige Rolle. In einem flüssigen Medium oder auf einer Nährlösung können sie sich durch ihre Flagellen schwimmend fortbewegen. Bewegen sich sehr viele Bakterien in einem Medium, kann diese Suspension makroskopisch näherungsweise als eine kontinuierliche Flüssigkeit gelten, also als aktives Fluid. Da viele Bakterienarten sehr gut charakterisiert sind und sich kontrolliert und reproduzierbar züchten lassen, eignen sie sich gut, um die Eigenschaften aktiver Fluide zu erforschen [3].

Physikalisch gesehen sind die vielfältigen Muster in Bakterienkolonien ein Paradebeispiel für das kollektive Verhalten selbstbewegter Stäbchen [4]. Häufig eingesetzt für solche Untersuchungen werden harmlose Heubazillen (*Bacillus subtilis*) oder Darmbakterien (*Escherichia coli*). In Suspensionen, in denen sich die Bakterien in einem Zustand kollektiver Bewegung befinden, treten neuartige und für Fluide ungewöhnliche Phänomene auf. So bilden sich Schwärme, d. h. große Gruppen (polare Cluster, **Abb. 1a**), die sich koordiniert in eine Vorzugsrichtung bewegen.

Bei hohen Dichten zeigte sich eine völlig neue Art von Turbulenz (**Abb. 1b**) [6, 10] – später mehr dazu. Hierbei bilden sich in der Suspension spontan größere Wirbel aus, die sich irregulär bewegen und wechselwirken. Auch hinter diesen Strukturen steckt eine kohärente Bewegung von benachbarten, in eine ähnliche Richtung schwimmenden Bakterien (polare Ordnung). Auf größerer Skala bewegen sich die Bakterien kollektiv im oder gegen den Uhrzeigersinn, was eine Wirbelströmung in der umgebenden Flüssigkeit hervorruft.

Unter anderen Bedingungen entsteht ein kollektives Bewegungsmuster, indem sich die meist stäbchenförmigen Bakterien entlang einer Vorzugsachse orientieren. Hierbei treten beide Schwimmrichtungen entlang einer solchen Orientierungslinie auf. Ein Muster, bei dem sich beispielsweise jeweils etwa die Hälfte der Bakterien nach links bzw. nach rechts bewegt, wird in aktiven Fluiden als nematischer Zustand bezeichnet – analog zu einer wohlbekannten flüssigkristallinen Phase. Nematische Muster zeigen sich sowohl mit räumlich homogener Dichte (**Abb. 1c**) als auch in Form von nematischen Bändern mit hoher Dichte (**Abb. 1d**).

Zahlreiche dieser Phänomene sind durch mechanische Effekte wie sterische (Volumen ausschließende) und hydrodynamische Wechselwirkungen zu erklären [4]. In vielen Fällen entscheiden aber auch biochemische Signale, ob und in welcher Form kollektives Verhalten auftreten kann. Aktuell beschäftigt sich die Forschung damit, die Ursachen und Mechanismen für das Auftreten der Strömungsmuster und Strukturen zu verstehen. Hierbei spielt die gezielte Veränderung von Bakterieneigenschaften eine wichtige Rolle.

Heute ist es möglich, die Gensequenzen vieler Bakterien zu entschlüsseln und so Mutanten zu erzeugen, die gezielt andere physikalische Eigenschaften aufweisen (z. B. ver-

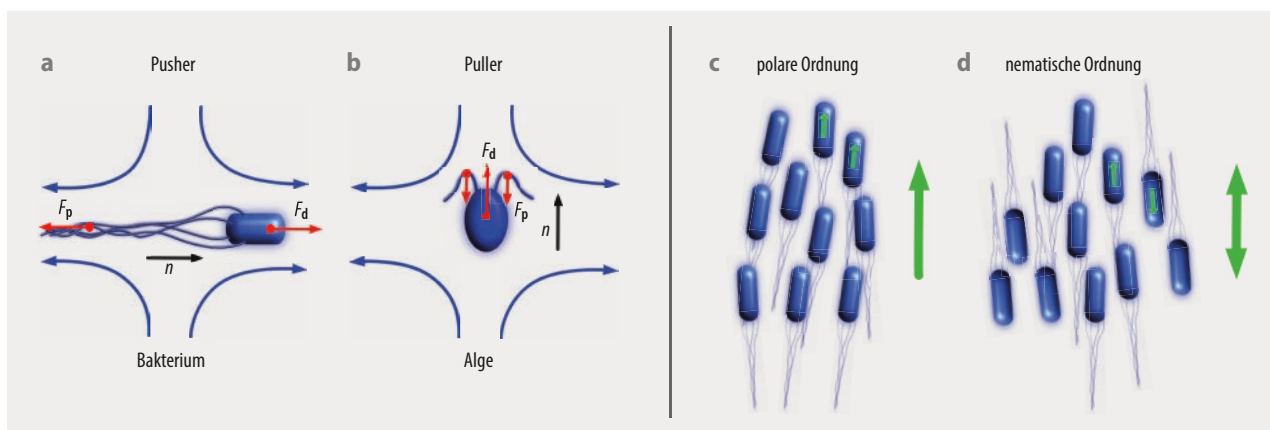
änderte Länge oder Schwimmeigenschaften). Zudem lässt sich die Empfindlichkeit der Bakterien für biochemische Signale unterdrücken. Dies ermöglicht es, kollektives Verhalten und Strukturbildung als rein physikalische Phänomene aufgrund des Zusammenspiels von aktiver Bewegung und rein mechanischer Wechselwirkung nachzuweisen. Durch den Vergleich der Strömungsmuster der ursprünglichen Bakterien mit den Mutanten sind Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen der Beschaffenheit einzelner Bakterien und deren kollektivem Verhalten möglich. Dies trägt zu einem mikroskopischen Verständnis aktiver Fluide bei.

## Theorie aktiver Fluide

Um die Phänomene und die ihnen zugrundeliegenden Mechanismen besser verstehen und beschreiben zu können, sind Modelle in Form von meist nichtlinearen Differentialgleichungen gefragt, die oft nur numerisch zu lösen sind. Dabei ist zwischen mikroskopischen Modellen, welche die Bewegung der Bakterien als wechselwirkendes Vielteilchensystem beschreiben, und makroskopischen Modellen, welche die Dynamik von Feldern auf der Kontinuumsebene beschreiben, zu unterscheiden.

Mikroskopische Modelle für Bakteriensuspensionen gehen oft von einem vereinfachten Mikroschwimmer aus. Ein schwimmendes Bakterium bewegt sich typischerweise durch rotierende Flagellen in einem Medium fort (passives Fluid, z. B. Wasser). Diese Flagellen erzeugen eine Strömung des passiven Fluids (Pusher, **Abb. 2a**). Ähnlich einem Brustschwimmer bewegen sich hingegen manche Algen, indem sie mit sogenannten Zilien an ihrer Vorderseite schlagen (Puller, **Abb. 2b**). Ein stark vereinfachter Modellansatz für solche Schwimmer ist ein selbstangetriebenes Teilchen (harter Zylinder, Stäbchen), das von einem charakteristischen Strömungsfeld umgeben ist.

Bei der Betrachtung sehr vieler dieser Mikroschwimmer geht die theoretische Beschreibung zu einem Kontinuum über. Hierbei lässt sich die Vielzahl möglicher Systeme auf Grundlage von Symmetrie und Erhaltungseigenschaften kategorisieren und in Universalitätsklassen einteilen, wobei jede Klasse ein definiertes makroskopisches Verhalten aufweist. Beispielsweise ist nach der Art der gebrochenen Symmetrie zu unterscheiden. So ist ein aktives Fluid, das aus vielen Stäbchen besteht, durch seine Orientierungen charakterisiert. Sind die Teilchen zufällig orientiert, ist das Fluid makroskopisch isotrop, d. h. es gibt keine ausgezeichnete Richtung. Bewegen sich dagegen viele Teilchen spontan in eine Richtung, wird diese Symmetrie gebrochen. Die durchschnittliche Orientierung der Teilchen ist in diesem Fall ähnlich wie bei einem Ferromagneten mit einem polaren Ordnungsparameter zu beschreiben (**Abb. 2c**). Hier ist die Rede von einem polaren aktiven Fluid. Ordnen sich die Teilchenorientierungen vorzugsweise parallel an, während sie sich in entgegengesetzte Richtung bewegen, spricht man von einer aktiven nematischen Ordnung (**Abb. 2d**) [11]. Das Studium dieser Modelle verbessert das Verständnis der experimentellen Beobachtungen und gibt erste Einblicke in die Mechanismen der Strukturbildung. Einen ausführlichen Überblick über die vielfältigen Modelle gibt [13].



**Abb. 2** Die erzeugte Strömung des Mikroschwimmers mit der Orientierung  $n$  lässt sich in erster Näherung durch die Wirkung eines Kräfte-dipols beschreiben: Beim Pusher wird das Fluid von der Seite nach vorn und hinten gepumpt (a), beim Puller von vorn und hinten an die Seite (b). Mikroschwimmer zeigen im Mittel in eine bevorzugte Richtung (polar, c) oder ordnen sich (anti-)parallel zueinander an (nematisch, d).

### Aktive Fluide fließen anders

Die rheologischen Eigenschaften eines Fluids bestimmen, wie es fließt oder strömt [14]. Bereits klassische passive Fluide zeigen abhängig von ihrer mikroskopischen Struktur ein reichhaltiges rheologisches Verhalten. Das heißt, ihre Fließeigenschaften können von der angelegten Scherspannung abhängen und sich mit der Zeit ändern. So ist es möglich, eine Ketchupflasche umzudrehen, ohne dass etwas herausfließt. Schüttelt man die Flasche hingegen, beginnt der Ketchup zu fließen. Durch den Eigenantrieb der Bakterien ändern sich die rheologischen Eigenschaften auf überraschende Weise. Beispielsweise steigt die Viskosität, wenn passive Kolloide wie sphärische Nanopartikel in eine Flüssigkeit gebracht werden (Stokes-Einstein-Relation).

Bei Bakterien dagegen nimmt die Viskosität mit steigender Dichte der Bakterien zunächst ab. Die effektive Viskosität ist somit kleiner als die der Flüssigkeit, in der die Bakterien schwimmen (meist Wasser). Im Extremfall kann die Viskosität verschwinden und das aktive Fluid reibungsfrei strömen. Dieses erstaunliche Phänomen ist durch die Aktivität in der Flüssigkeit zu erklären, die der dissipativen Viskosität entgegenwirkt und diese kompensiert.

Der scheinbare Übergang zu einer Art „Superfluidität“ hat weitreichende Konsequenzen für halbverdünnte und dichte Suspensionen und liegt der Entstehung spontaner Strömungen zugrunde. Weitere Beobachtungen zeigen, dass aktive Fluide den Transport passiver Kolloide verbessern können und sich auch bei kleinen Reynolds-Zahlen sehr gut durchmischen.

### Von aktiver Turbulenz zu geordneten Strukturen

Trotz der sehr geringen Reynolds-Zahl zeigen aktive Fluide turbulentes Verhalten, das in mancher Hinsicht phänomenologisch an klassische Turbulenz erinnert. Allerdings unterscheidet sich diese „aktive Turbulenz“ doch deutlich von ihrem klassischen Pendant. In der Regel treiben äußere Kräfte die klassische Turbulenz bei hohen Reynolds-Zahlen. Dies erzeugt Scherungen und Verwirbelungen, die sich

nicht durch viskose Effekte dämpfen lassen. Beispielsweise zerfallen Wirbel, die durch Rühren entstehen, in kleinere Wirbel oder verschmelzen zu größeren Wirbeln. Dies ruft komplexe Strömungsmuster hervor.

In Suspensionen aktiver Teilchen dominieren bei den meist kleinen Reynolds-Zahlen viskose Dämpfung sowie die Reibung zwischen der Suspension und dem Substrat. Dennoch können komplexe, räumlich sowie zeitlich ungeordnete Strömungsmuster entstehen, wenn aktive Teilchen die Strömung auf kleinen Skalen kontinuierlich antreiben. Bei diesem kollektiven Phänomen resultieren Wirbel aus einer großen Zahl aktiver Teilchen. Daher wird dieser Vorgang häufig als Mesoskalenturbulenz bezeichnet.

Trotz ihrer gegenüber klassischen Fluiden fundamental verschiedenen Eigenschaften lassen sich aktive Fluide mit Methoden der für Turbulenz entwickelten statistischen Hydrodynamik beschreiben [15, 16]. So sind statistische Größen wie Korrelationsfunktionen mittels Turbulenztheorie zu berechnen. Die Untersuchung turbulenter Zustände in Bakteriensuspensionen mithilfe von Korrelationsfunktionen zeigt, dass Wirbel einer bestimmten Größe bevorzugt auftreten, deren charakteristische Längenskala z. B. von der Form und der Motilität der Bakterien abhängt und in der Regel mindestens eine Größenordnung über der Länge individueller Bakterien liegt. Interessanterweise erlauben es theoretische Modelle zu zeigen, dass dieses Phänomen dem Entstehen größerer Wirbel in klassischer zweidimensionaler Turbulenz ähnelt, die sonst zur Erklärung der Strömungsmuster in den Atmosphären von Planeten dient.

Faszinierenderweise können sich unter bestimmten Bedingungen in einem aktiven Fluid aus einer räumlich sowie zeitlich ungeordneten Strömung geordnete Muster bilden (**Abb. 3**). In einer Suspension von schwimmenden Bakterien bei hoher Dichte können beispielsweise räumlich geordnete Wirbel auftreten, die man sich jeweils als eine kollektive Ansammlung lokal gleich ausgerichteter Bakterien vorstellen kann. Geordnete Wirbelstrukturen lassen sich auch in Modellen für aktive Fluide nachvollziehen (**Abb. 3a**). Ein quadratisches Wirbelgitter (**Abb. 3a**, links) bildet sich in

unmittelbarer Nähe einer Instabilität eines homogenen, ungeordneten Zustands. Sie entsteht, weil sich ein Aktivitätsparameter der einzelnen Bakterien erhöht, zum Beispiel die Schwimgeschwindigkeit. Neue Simulationen zeigen, dass für aktive Fluide mit besonders starker Advektion ein hexagonales Wirbelgitter mit gleichorientierten Wirbeln entstehen kann (Abb. 3a, rechts). Somit helfen Simulationen, ein besseres Verständnis von kollektiver Ordnung in aktiven Fluiden zu entwickeln.

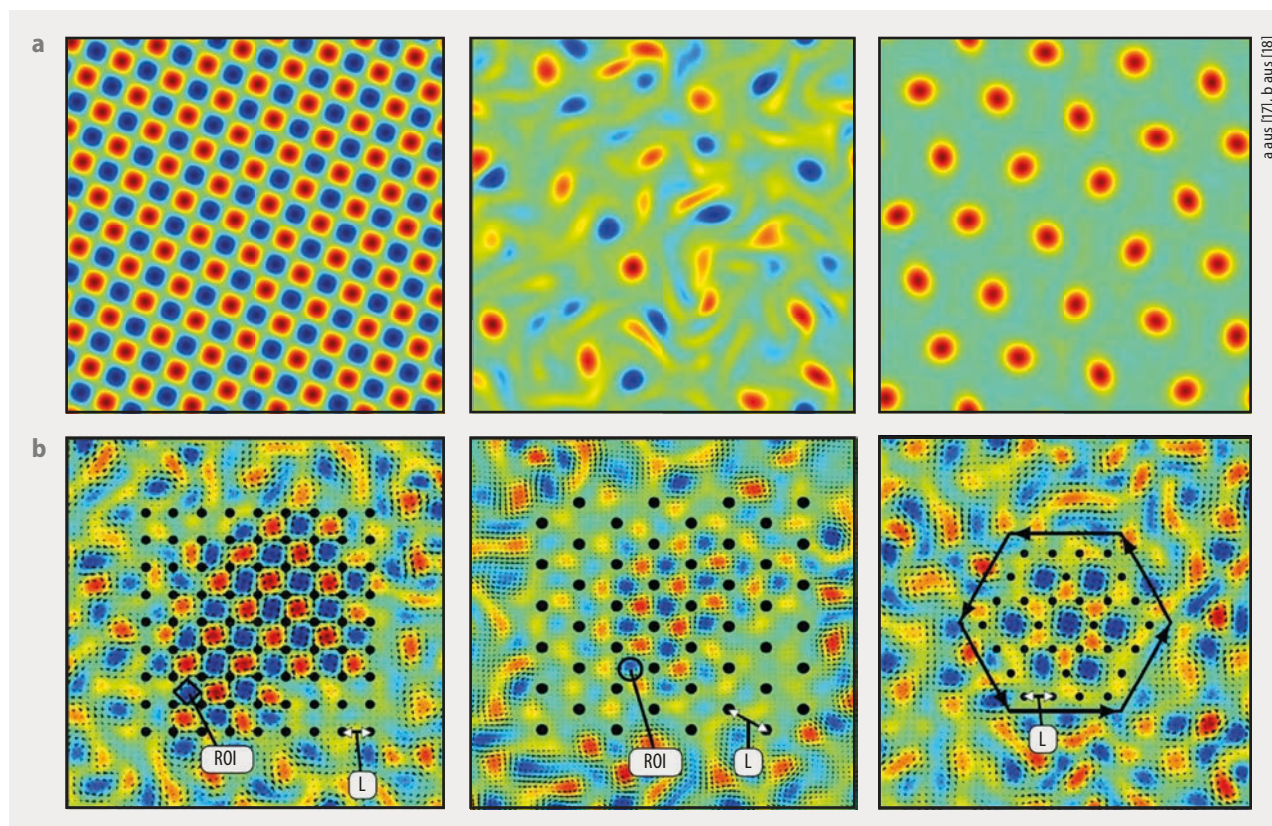
Für die meisten Parameter zeigen die Modellgleichungen genau wie die oben erwähnten Experimente für Bakteriensuspensionen turbulentes Verhalten, das mit einer charakteristischen Wirbelgröße einhergeht (Abb. 3a, Mitte). Diese Turbulenz kann aber durch die geometrische Vorstrukturierung des Behälters, in dem sich die bakterielle Suspension befindet, in ein reguläres Muster übergehen. So ist es experimentell in Bakteriensuspensionen gelungen, die turbulente Bewegung durch Ränder und Hindernisse zu bändigen. Experimente zeigen beispielsweise, wie sich einzelne Wirbel stabilisieren lassen [19] oder verschiedene Arten von Wirbelgittern auftreten, z. B. [20]. Dabei können benachbarte Wirbel in diesen Gittern entweder den gleichen („ferromagnetisch“) oder den entgegengesetzten Rotationssinn („antiferromagnetisch“) ausbilden. Simulationen reproduzieren z. B. eine antiferromagnetische Wirbelanordnung, wenn die Gitterkonstante der typischen Skala entspricht, die auch in der Turbulenz auftritt (Abb. 3b) [18].

Generell hängen das Auftreten und die spezifische Form von Strukturen in aktiven Fluiden von Parametern wie der Dichte, Geschwindigkeit und Form der aktiven Teilchen sowie der Stärke und Symmetrie ihrer Wechselwirkung untereinander ab. Zudem spielen die Geometrie und Dimension des Systems eine Rolle.

### Ausblick

Wir haben die Diskussion aktiver Fluide bisher weitgehend auf Suspensionen schwimmender Bakterien eingeschränkt. In den letzten Jahren hat sich das Spektrum der betrachteten Systeme und der beteiligten Disziplinen aber stark erweitert. So wird in der Chemie und in den Materialwissenschaften intensiv über die Eigenschaften künstlicher aktiver Fluide geforscht – meist anhand von Suspensionen aktiver Kolloidteilchen. Die für die aktive Teilchenbewegung benötigte Energie stellen hierbei zum Beispiel Licht, externe elektrische Felder oder chemische Reaktionen an der heterogen präparierten Teilchenoberfläche zur Verfügung. So gelang es in einer Suspension aus elektrisch getriebenen Teilchen, eine polare aktive Flüssigkeit zu realisieren (Abb. 1e).

Ein zweites bedeutsames Anwendungsfeld für das Konzept der aktiven Fluide ist das Verständnis der Strukturbildung in biologischen Zellen und Geweben. Das Zusammenspiel von Biopolymeren und molekularen Motoren erzeugt



**Abb. 3** Simulationen eines aktiven polaren Fluids zeigen, wie sich Strukturen ausbilden. In einer Suspension schwimmender Bakterien bei hoher Dichte treten links- (rot) und rechtsdrehende (blau) Wirbel auf (a), die zunächst ein reguläres quadratisches Wirbelgitter bilden (links). In der Mitte ist die Mesoskalenturbulenz zu sehen, rechts ein hexagonales Wirbelgitter. Die verschiedenen Strömungsmuster ergeben sich durch Veränderung der Aktivitätsparameter. Verschiedene Konfigurationen von Hindernissen können ferro- und antiferromagnetische Wirbelgitter in der Mesoskalenturbulenz stabilisieren (b).

innerhalb von Zellen polare und apolare aktive Teilchen. Wichtige Anwendungen sind die Muskelkontraktion, bei der Motorproteine (Myosin) mit semiflexiblen Filamenten (Aktin) zusammenwirken, oder die Zellteilung, bei der sich die Chromosomen durch die Wechselwirkung der Mikrotubuli mit speziellen Motorproteinen (Kinesin) auf die entstehenden Tochterzellen verteilen. Aus diesen Bestandteilen lassen sich viele der oben für Bakterien beschriebenen Phänomene künstlich (*in vitro*) in sogenannten Motility-Assays nachbilden. In diesen erzeugen molekulare Motoren, die an ein Substrat gebunden sind, eine aktive Bewegung von Biofilamenten. Unter anderem finden sich in einem dieser Systeme sogar polare Cluster und nematische Bänder als koexistierende Strukturen (**Abb. 1f**). Ein weiteres Feld ist die Untersuchung biologischer Gewebe, beispielsweise in der Wundheilung.

Dieser kurze Überblick zeigt, warum sich das Konzept der aktiven Fluide sowohl in der Biophysik als auch im Feld weicher Materialien einen prominenten Platz erobert hat. Die Erforschung aktiver Fluide liefert Anhaltspunkte für Mechanismen von biologischer Strukturbildung und Morphogenese und damit möglicherweise auch für die Entstehung und Therapie von Krankheiten. Die beschriebenen ungewöhnlichen Eigenschaften aktiver Fluide wecken zudem große Hoffnung, neue Materialien designen zu können.

#### Literatur

- [1] L. Pismen, Active matter within and around us, Springer Nature Switzerland, Cham (2021)
- [2] M. C. Marchetti et al., Rev. Mod. Phys. **85**, 1143 (2013)
- [3] A. Be'er und G. Ariel, Mov. Ecol. **7**, 9 (2019)
- [4] M. Bär et al., Annu. Rev. Cond. Mat. Phys. **11**, 441 (2020)
- [5] H. P. Zhang et al., Proc. Nat. Acad. Sci. **107**, 13626 (2010)
- [6] J. Dunkel et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 228102 (2013)
- [7] D. Nishiguchi et al., Phys. Rev. E **95**, 020601(R) (2017)
- [8] A. Bricard et al., Nature **503**, 95 (2013)
- [9] L. Huber et al., Science **361**, 255 (2018)
- [10] H. H. Wensink et al., Proc. Nat. Acad. Sci. **109**, 14308 (2012)
- [11] H. Chaté, Annu. Rev. Cond. Mat. Phys. **11**, 189 (2020)
- [12] H. Reinken et al., Phys. Rev. E **97**, 022613 (2018)
- [13] M. R. Shaebani et al., Nat. Rev. Phys. **2**, 181 (2020)
- [14] D. Saintillan, Annu. Rev. Fluid Mech. **50**, 563 (2018)
- [15] V. Bratanov, F. Jenko und E. Frey, Proc. Nat. Acad. Sci. **112**, 15048 (2015)
- [16] M. James, W. J. T. Bos und M. Wilczek, Phys. Rev. Fluids **3**, 061101(R) (2018)
- [17] M. James et al., Nat. Commun. **12**, 5640 (2021)
- [18] H. Reinken et al., Commun. Phys. **3**, 76 (2020)
- [19] H. Wioland et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 268102 (2013)
- [20] D. Nishiguchi et al., Nat. Commun. **9**, 4486 (2018)

## Die Autoren



**Michael Wilczek** (FV Dynamik und Statistische Physik) promovierte 2011 an der U Münster. Nach Aufenthalt am Kavli Institute for Theoretical Physics in Santa Barbara und an der Johns Hopkins Universität in Baltimore leitete er von 2015 an eine unabhängige Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen.

Seit 2021 ist er Professor für Theoretische Physik an der Universität Bayreuth.

**Sebastian Heidenreich** (FV Dynamik und Statistische Physik sowie Biologische Physik) promovierte 2009 an der TU Berlin. Nach Aufenthalt am Rudolf Peierls Centre for Theoretical Physics an der University of Oxford und am Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt ging er 2011 an die Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Seit 2020 ist er dort Leiter der Arbeitsgruppe Numerische Verfahren.



**Markus Bär** (FV Dynamik und Statistische Physik sowie Biologische Physik) promovierte 1993 an der FU Berlin. Nach Stationen an der Princeton University und am Center for Nonlinear Studies in Los Alamos übernahm er 1995 die Leitung einer Nachwuchsgruppe am Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme in Dresden. 2002 habilitierte er sich an der TU

Dresden. Seit 2004 ist er Leiter des Fachbereichs Modellierung und Datenanalyse an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und seit 2013 außerplanmäßiger Professor für Theoretische Physik an der TU Berlin.

**Prof. Dr. Michael Wilczek**, Theoretische Physik I, Universität Bayreuth, Universitätstr. 30 / NW II, 95447 Bayreuth, **Dr. Sebastian Heidenreich** und **Prof. Dr. Markus Bär**, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Abbestr. 2–12, 10587 Berlin