

# Physik der Mikroschwimmer

## Von Schwimmern und Schwärmen

PRIYANKA IYER | GERHARD GOMPPER

*Zäh wie Honig – so erfährt ein schwimmender Mikroorganismus seine wässrige Umgebung. Ursache ist natürlich die Physik. Sie spielt zudem im Schwarmverhalten solcher Mikroschwimmer mit. Die Simulation dieses Schwarmverhaltens ist auch für medizinische und technische Anwendungen interessant.*

Vom wandernden Albatros auf seiner unermüdlichen Reise über den Pazifischen Ozean bis hin zum Spermium, das sich seinen Weg zum Ei bahnt – das Leben ist ständig in Bewegung. Bewegung ist der Grundstein für die Nahrungssuche, die Ausbreitung einer Spezies und letztlich das Überleben. Die Bewegung lebender Organismen lässt sich grob in zwei Hauptkategorien einteilen: aktive, selbstangetriebene Bewegung, wie man sie bei einem rennenden Fußgänger oder einem fliegenden Vogel beobachten kann, und passive Bewegung, wie sie von Pollenkörnern, die vom Wind getragen werden, oder Quallen, die in den Meeresströmungen treiben, zu beobachten ist.

Auch Mikroorganismen sind, ohne dass wir es merken, ständig in Bewegung. Doch welche Körper bewegen sich auf der Mikroebene? Dies umfasst die Aktivität von Bakterien, Spermien [1], Parasiten und dergleichen, die typischerweise nur 10–100  $\mu\text{m}$  groß sind, was etwa der Dicke einer Haarsträhne entspricht. Wie sieht – verglichen mit unserer täglichen Erfahrung – die Welt der Mikroorganismen aus? Die Antwort lautet: teils sehr ähn-

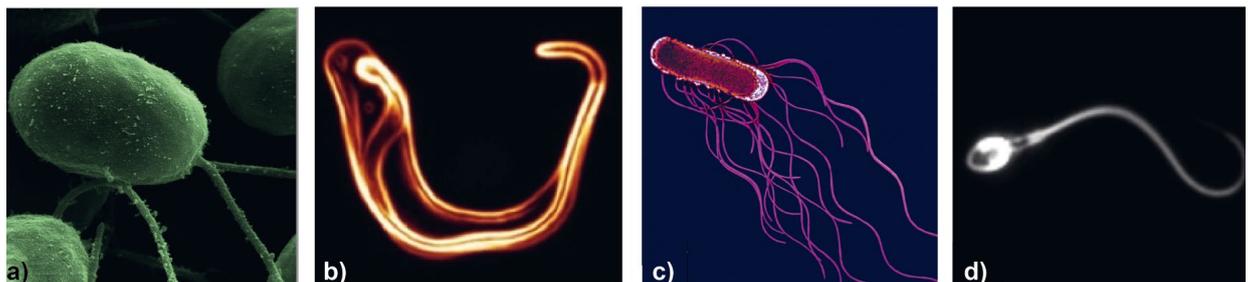
lich, teils jedoch sehr anders, aber nicht unbedingt einfacher.

Der überwiegende Teil der Mikroorganismen lebt in Flüssigkeiten, etwa Wasser, sodass die Bewegung durch die Hydrodynamik bestimmt wird. Hier kommt ein wichtiger physikalischer „Ähnlichkeitseffekt“ zum Tragen: Die Bewegung in einer Flüssigkeit ist auf allen Längenskalen gleich, aber durch einen Parameter bestimmt, der vom Verhältnis von Größe und Geschwindigkeit des Schwimmers zur Viskosität der umgebenden Flüssigkeit abhängt.

Deshalb gibt es bei der Bewegung in einer Flüssigkeit einen wesentlichen Unterschied zwischen klein und groß. Große Schwimmer haben eine große Masse und sind daher träge, haben auch eine hohe Vortriebskraft und erfahren deshalb nur eine geringe Flüssigkeitsviskosität. Bei kleinen Schwimmern ist es genau umgekehrt: Sie haben wenig Trägheit und sind mit einer effektiv hohen Viskosität konfrontiert. Deshalb bleibt ein kleiner Schwimmer, wie ein Bakterium, sofort stehen, wenn der Motor abgeschaltet wird, während ein großer Schwimmer, wie ein Mensch, einige Schwimmerlängen durch Wasser gleiten kann. Schwimmen auf der Mikroskala ist daher, als müsste ein Mensch in Honig schwimmen. Darüber hinaus bleibt auf der Mikroskala nichts in Ruhe liegen – sondern alles bewegt sich aufgrund der thermischen Molekularbewegung. Da hatten also die alten Griechen völlig recht, wenn sie sagten: „panta rhei“ (πάντα ῥεῖ, alles fließt).

### Antrieb und Wechselwirkungen

Ein genauerer Blick auf das Verhalten von Systemen aktiver, selbstangetriebener und selbststeuernder Organismen und



**Abb. 1** Verschiedene Arten biologischer Mikroschwimmer: a) Mikroalgen (*Chlamydomonas*), b) Parasiten (*Trypanosomen*, Schlafkrankheit), c) Bakterien (*Salmonellen*), d) Spermien.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Maschinen enthüllt eine Vielzahl interessanter Phänomene und Fragestellungen [2]. Wie schwimmt ein Mikroschwimmer in einer Flüssigkeit? Daraus folgt die Frage, wie Mikroschwimmer mit ihrer Umgebung und mit anderen Mikroschwimmern wechselwirken. Welches Verhalten ergibt sich, wenn sich viele von ihnen zusammen bewegen? Ferner fragt man sich, welche Art von Wahrnehmung möglich ist, wenn die Organismen und Maschinen immer kleiner werden. Welche Bewegungsmuster resultieren, wenn die Individuen durch Steuerung ihrer Bewegung auf die Bewegung ihrer Nachbarn reagieren können?

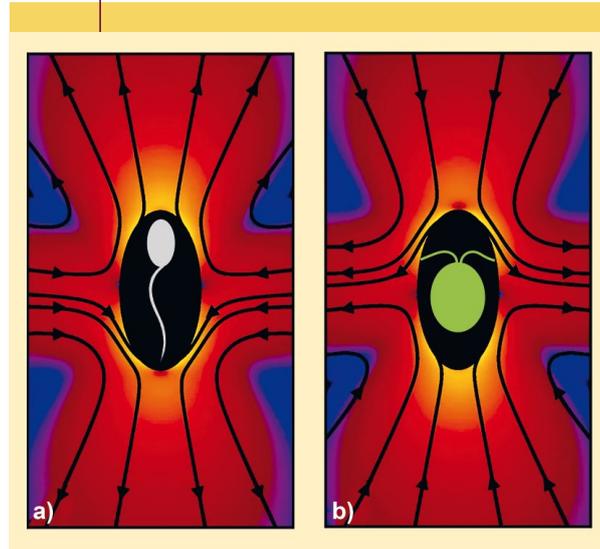
In der Natur haben sich im Lauf der Evolution eine große Zahl von Mikroschwimmern entwickelt: Bakterien, Spermien, Mikroalgen, Parasiten und viele mehr (Abbildung 1). Ein wesentlicher Aspekt ist hierbei, wie sie sich eigentlich in einer Flüssigkeit bewegen können. Erstaunlicherweise haben sich hier trotz der enormen Vielfalt an Spezies einige wenige Antriebsmechanismen durchgesetzt, von denen die meisten auf der aktiven Bewegung langer dünner Filamente – Flagellen oder Zilien – beruhen.

Es gibt zwei wesentliche Domänen zellulärer Lebewesen, die Prokaryoten ohne Zellkern – hauptsächlich Bakterien – und die Eukaryoten, deren Zellen einen Zellkern besitzen und eine vielfältige Kompartimentierung aufweisen, nämlich Tiere und Pflanzen. Interessanterweise ist auch die Fortbewegung durch Flagellen in diesen beiden Domänen fundamental verschieden [2]. Prokaryoten besitzen ein helikales, schraubenförmiges, und passives Flagellum, das durch einen Motor in der Zellwand in Rotation versetzt wird. Der Vortrieb funktioniert ganz ähnlich wie die Schiffsschraube beim Motorboot. Im Gegensatz dazu hat das eukaryotische Flagellum mehrere relativ steife Filamente, die durch Motorproteine, die auf die gesamte Länge des Flagellums verteilt sind, lokal gegeneinander verschoben werden. Das geschieht so, dass sich eine schlangenförmige Deformation des Flagellums ergibt. Dementsprechend funktioniert der Vortrieb dann auch genauso, nämlich wie bei einer Schlange, die sich durch das Gras schlängelt [1].

Nun können Teilchen, die sich in einer Flüssigkeit bewegen, von der Bewegung anderer Teilchen beeinflusst werden, ohne mit ihnen zusammenzustoßen oder durch andere, etwa elektrostatische Kräfte, mit ihnen zu wechselwirken. Diese hydrodynamische Wechselwirkung entsteht durch die Strömung der Flüssigkeit, die durch ein Teilchen erzeugt und vom anderen Teilchen „gespürt“ wird.

Es gibt – im hydrodynamischen Sinn – zwei wesentliche Arten von Mikroschwimmern. Die einen haben den Antrieb an ihrem hinteren Ende, der einen passiven Vorderteil vorantreibt, weshalb sie „Pusher“ genannt werden (Abbildung 2a). Bei der anderen Art steckt umgekehrt der Antrieb im vorderen Teil, der den passiven hinteren Teil vorwärts zieht, deshalb heißen sie „Puller“ (Abbildung 2b). Im Strömungsbild eines Pushers zeigt eine durch den Antrieb erzeugte Strömung nach hinten und eine durch die Vorwärtsbewegung des passiven „Körpers“ erzeugte Strömung nach vorne. Nun ist die in der Regel wässrige Flüssigkeit inkom-

ABB. 2 | PUSHER & PULLER



**Hydrodynamisches Strömungsfeld von a) Pushern und b) Pullern, illustriert am Beispiel von Spermien und Chlamydomonas-Algen [2]. Die schwarzen Linien (mit Pfeilen) deuten die Strömungslinien der Flüssigkeitsbewegung an, die sich durch die Aktivität der Mikroschwimmer entwickelt.**

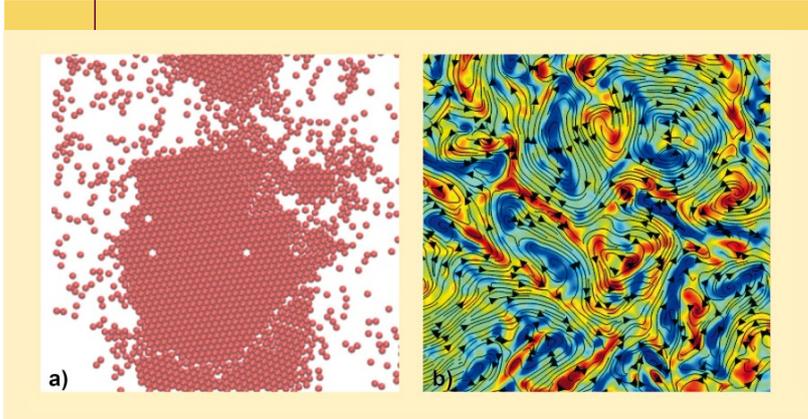
pressibel, also muss die nach vorne und hinten weggedrückte Flüssigkeit irgendwie ersetzt werden, und das kann nur durch Einströmen „neuer“ Flüssigkeit von der Seite geschehen. Für Puller ist das Bild ähnlich, nur sind die Strömungsrichtungen umgekehrt.

Das Strömungsfeld von Pullern und Pushern und die hydrodynamische Wechselwirkung haben wichtige Konsequenzen für das Verhalten zum Beispiel in der Nähe von Wänden. Wenn ein Pusher parallel zur Wand schwimmt, dann versucht er, Flüssigkeit von der Seite anzusaugen; das wird aber durch die Anwesenheit der Wand behindert oder verhindert, mit dem Ergebnis, dass der Schwimmer selbst von der Wand angezogen wird. Das ähnelt einer Staubsaugerdüse: Wird sie bei laufendem Motor zu nahe an ein Sofakissen gehalten, dann wird sie zum Kissen hingezogen. Ähnliches gilt, wenn sich zwei Mikroschwimmer nahekommen. Ein Puller reorientiert sich hingegen zuerst senkrecht zur Wand und wird dann auch angezogen.

### Mikroschwimmer dicht gedrängt

Wir kennen es vom Autoscooter auf dem Jahrmarkt: Wenn viele Leute gleichzeitig jeweils ein Auto fahren, dann kommt es oft zu kleinen Zusammenstößen, die dann schnell in einer Massenkarambolage enden. In der Welt der selbstangetriebenen Teilchen wird dies als „bewegungsinduzierte Aggregation“ [3, 4] bezeichnet. In einem Bereich hoher Dichte stoßen die Teilchen oft aneinander und können sich deshalb nur langsam bewegen. Außerhalb, in Bereichen niedrigerer Dichte, bewegen sich Teilchen hingegen schnell und kollidieren so mit den schon gebildeten Aggregaten, die deshalb weiter anwachsen. Es ist wie beim Verkehrstau auf der Autobahn, nur nicht auf einer ein-

**ABB. 3 | TURBULENZ AKTIVER BROWNSCHER TEILCHEN**



**a) Motilitätsinduzierte Phasentrennung aktiver Brownscher Teilchen. b) Strömungsbild bei bakterieller Turbulenz [5]. Rechts- und linksdrehende Wirbel sind blau und rot markiert.**

### AKTIVE BROWNSCHE TEILCHEN

Mikroskopisch kleine Teilchen mit einem Durchmesser von zirka 10  $\mu\text{m}$  oder weniger – sogenannte Kolloide – werden in einer Flüssigkeit durch die Kollision mit den sich thermisch bewegenden Molekülen der Flüssigkeit in eine zufällige Bewegung versetzt. Diese Brownsche Molekularbewegung ist unter dem Mikroskop sichtbar. Benannt ist sie nach dem englischen Biologen James Brown, der dies 1868 zuerst beobachtet hat.

Manche dieser Teilchen können sich aber auch selbst aktiv vorwärtsbewegen, und zwar entweder weil sie eine chemische Reaktion an ihrer Oberfläche katalysieren, oder weil es sich um lebende Mikroorganismen wie Bakterien, Spermien oder Mikroalgen handelt, die einen Motor zum Antrieb besitzen. Diese Teilchen – modelliert als aktive Brownsche Teilchen – schwimmen typischerweise mit einer ziemlich konstanten Geschwindigkeit  $v_0$ , weisen aber aufgrund der thermischen Bewegung im Umfeld immer noch kleine Änderungen der Orientierung auf, die sich im Lauf der Zeit immer weiter aufaddieren. Diese zufälligen Richtungsänderungen werden als Rotationsdiffusion bezeichnet und durch den Diffusionskoeffizienten  $D_R$  charakterisiert. Ein gutes Beispiel ist die Fortbewegung eines Betrunknen: Je höher sein Alkoholspiegel, desto größer sind dessen Richtungsfluktuationen.

Nach einer Zeit  $t_R = 1/D_R$  ist die Orientierung kaum mehr mit der



**Trajektorien aktiver Brownscher Teilchen mit starken (rot) und schwachen (grün) Orientierungsfluktuationen. Der Startpunkt ist grau markiert.**

vorigen Orientierung korreliert; in dieser Zeit hat das Teilchen nahezu geradlinig eine Wegstrecke  $v_0 t_R$  zurückgelegt. Nach vielen solchen geradlinigen Teilstücken, die mit zufälligen Winkeln aneinander gereiht sind, ist dann der quadratische Abstand vom Ausgangspunkt der Bewegung

$$(v_0/D_R)^2 t / t_R = D_{T,\text{eff}} t$$

angewachsen, wobei  $t$  die Gesamtzeit der Bewegung ist. Das ergibt den effektiven Koeffizienten

$$D_{T,\text{eff}} = v_0^2/D_R$$

für die Translationsdiffusion.

Dieses Ergebnis ist interessant, weil es zeigt, dass die aktive Diffusion sehr viel schneller zu einem Ziel führt als die thermische Diffusion. Dies ist sowohl für die Ausbreitung von biologischen Mikroorganismen von Bedeutung, um neue Lebensräume zu besiedeln, als auch für technische Anwendungen, wie die schnelle Verteilung von Arzneimittelträgern im Blut.

dimensionalen Linie, der Straße, sondern auf einer zweidimensionalen Fläche. Der Effekt ähnelt phänomenologisch sehr einem Gas aus Molekülen, die sich gegenseitig anziehen und daher eine Gasphase sowie eine Flüssigkeitsphase in Koexistenz ausbilden. Deshalb wird auch von „motilitätsinduzierter Phasenseparation“ gesprochen (Abbildung 3a), nur gibt es hier gar keine attraktive Wechselwirkung.

Ein solches Verhalten wird beobachtet, wenn Bakterien eine Oberfläche besiedeln und dabei einen sogenannten Biofilm bilden [5] – wohlbekannt vom Zahnbelag, der sich bei Vernachlässigung des Zähneputzens bildet. Dies passiert am Anfang durch einige wenige Bakterien, die sich wiederholt teilen und mit zunehmender Dichte zuerst kleinere und dann große Aggregate bilden, durch bewegungsinduzierte Aggregation. Schließlich bedecken sie die Oberfläche in Form einer Monoschicht komplett. Später wird aus dieser Monolage ein dicker, dreidimensionaler Film – aber das soll uns hier nicht interessieren.

Auch in dieser Monoschicht können sich die Bakterien noch bewegen. Dann sieht ihre Dynamik ziemlich chaotisch aus, ein bisschen wie im Ameisenhaufen. Tatsächlich ist die Bewegung nicht einfach nur ein Durcheinander, sondern ähnelt einem Phänomen, das aus vielen ganz anderen Bereichen der Physik bekannt ist – der Turbulenz.

Die normale, „hydrodynamische“ Turbulenz wird beobachtet, wenn Wasser sehr schnell durch einen Kanal mit Hindernissen bewegt, wie beim Wildwasser-Kanuslalom, mit vielen großen und kleinen Wirbeln. Diese Art der Turbulenz wird durch eine hohe Strömungsgeschwindigkeit auf großen Längenskalen erzeugt. Bei der bakteriellen – oder aktiven – Turbulenz ist die treibende Kraft hingegen die Aktivität der mikroskopischen Teilchen innerhalb der Flüssigkeit (Abbildung 3b). Hier gibt es viele phänomenologische Ähnlichkeiten, etwa die sogenannte Energiekaskade: Die Energie der Wirbel hängt von der Wirbelgröße ab und wird zwischen den großen und kleinen Wirbeln ausgetauscht. Es gibt aber zwei wesentliche Unterschiede: Während bei hydrodynamischer Turbulenz die Strömungsgeschwindigkeit sehr groß ist und die Wirbelgröße von mehreren Metern bis zu Millimetern reicht, ist bei der bakteriellen Turbulenz die Geschwindigkeit winzig, und es gibt eine maximale Wirbelgröße, die ungefähr dem Zehnfachen der Bakteriengröße entspricht. Also: Um ein solches wildes Treiben der Bakterien auf den Zähnen zu vermeiden, unbedingt regelmäßig Zähne putzen.

Turbulenz wird auch in der Astrophysik als Plasmaturbulenz, zum Beispiel bei Stürmen auf der Sonne, beobachtet. Sie ist folglich ein Phänomen, das auf einem riesigen Bereich von Längenskalen auftritt – von der Sternatmosphäre über den Wildwasserkanal bis zum Biofilm, etwa dem dentalen.

### Intelligente selbstangetriebene Teilchen

Biologische Organismen zeichnen sich durch ihre Fähigkeit aus, ihre Umgebung wahrzunehmen, insbesondere die Prä-

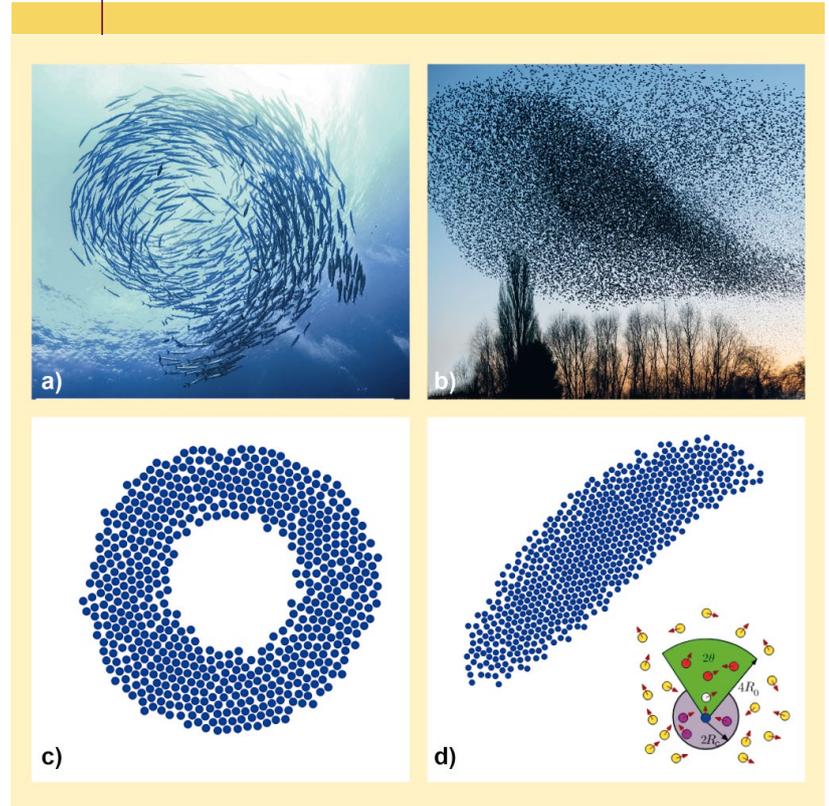
senz anderer Individuen in ihrer Nähe. Sie können diese Information verarbeiten und darauf durch Veränderung ihrer Bewegungsrichtung reagieren und so Schwärme und Herden bilden [6]. Natürlich fallen einem da als Erstes Beispiele aus unserer alltäglichen Wahrnehmung ein: Schwärme von Fischen oder Vögeln (Abbildungen 4a und b), Herden von Schafen oder Rentieren und Gnus, aber auch die Bildung von Gruppen im Gänsemarsch in Menschenmengen. In diesen Fällen findet die Wahrnehmung visuell statt, und die Informationsverarbeitung im Gehirn ist natürlich sehr komplex. Die visuelle Wahrnehmung ist auf Organismen beschränkt, die groß genug sind, mit einer Minimalgröße von zirka 5 mm. Aber auch kleinere Organismen besitzen die Fähigkeit einer gerichteten Wahrnehmung. Hierbei handelt es sich um sogenannte Chemotaxis, das heißt, diese Organismen können chemische Gradienten erkennen und sich an der Gradientenrichtung orientieren. Beispiele sind Spermien, die auf diese Weise den Weg zur Eizelle finden [1], und weiße Blutkörperchen, die während einer Grippeerkrankung Killerzellen auf die Spur der Viren im infizierten Gewebe setzen [7] (Abbildung 5).

Im Bereich selbststeuernder intelligenter Teilchen gibt es eine Vielzahl interessanter Systeme und Fragestellungen. Wir wollen zwei davon exemplarisch betrachten: erstens ein Jäger-Beute-System, in dem sich die Beute geradlinig bewegt, und zweitens ein System vieler gleichartiger Individuen, die zusammen einen Schwarm bilden [8]. Wir nehmen an, dass die Teilchen sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen und andere Teilchen nur wahrnehmen können, wenn sie in deren Gesichtsfeld liegen. Die Wahrnehmung ist also auf die instantane Position beschränkt, während die Bewegungsrichtung oder Geschwindigkeit der Nachbarn nicht abgeschätzt werden kann.

Unter diesen stark vereinfachenden Annahmen hängt das Verhalten dann immer noch vom Blickwinkel, der Teilchengeschwindigkeit  $v_0$ , den Fluktuationen in der Bewegungsrichtung, charakterisiert durch den Diffusionskoeffizienten  $D_R$ , und der Wendigkeit  $W$  ab (siehe „Aktive Brownsche Teilchen“, Seite 230). Hierbei beschreibt der Begriff Wendigkeit, wie schnell sich die Bewegungsrichtung ändern lässt, um auf das wahrgenommene Ziel zuzusteuern. Das ist ganz ähnlich wie beim Autofahren: Je mehr Kraft der Fahrer aufwendet, um das Lenkrad zu drehen, desto schneller und mit kleinerem Wendekreis wendet das Auto. Der dynamische Wendekreis der Teilchen ergibt sich deshalb aus dem Verhältnis  $v_0/W$ , da die Steuerkraft umso größer sein muss, je höher die Geschwindigkeit ist – der Ferrari erfordert eine größere Steuerkraft als das Bobbycar.

Wenn wir uns nun die Verfolgung einer Beute durch Jäger anschauen, dann sieht der Jäger aus dem Augenwinkel die Beute und versucht darauf zuzusteuern. Bei einem relativ großen Wendekreis schafft er es aber nicht, das Ziel zu treffen und schießt daran vorbei. Dann muss er umkehren, und das Spiel geht wieder von vorne los. Beispiele für ein solches Verhalten ist auf der großen Längenskala die Jagd von Hund und Hase, auf der Mikroskala die „Jagd“ des

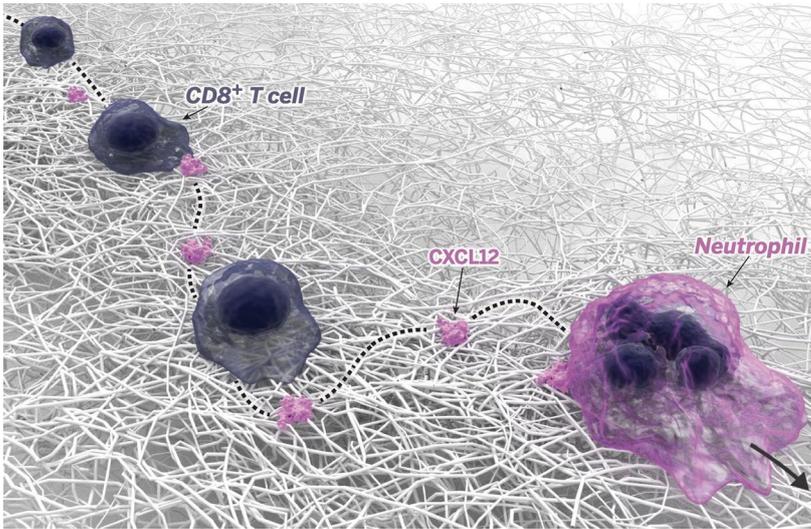
ABB. 4 | SCHWARMBILDUNG



Oben: Schwarmbildung in biologischen Systemen wie a) Fische (Foto: iStock) und b) Vögel (Stare) (Foto: A. Beukhof / Adobe Stock). Unten: Simulationen von intelligenten aktiven Brownschen Teilchen mit visueller Wahrnehmung und Orientierungsausrichtung (kleines Bild) zeigen ähnliches Verhalten, nämlich c) gemeinsame Kreisbewegung oder d) einen langgezogenen Schwarm.

Spermiums auf ein weibliches Ei. Ohne ein bisschen „Rauschen“ in der Orientierung ergibt sich tatsächlich ein quasiperiodisches Umkreisen der Beute, das nie zum Ziel führt. Die Situation erinnert an den Mond, der die ganze Zeit auf die Erde zustürzt, sein Ziel aber wegen der anfänglichen Tangentialbewegung nie erreicht. Etwas Rauschen kann also manchmal ganz nützlich sein, um sein Ziel zu erreichen! In unserem Fall bei kleinen Teilchen bringt die Brownsche Molekularbewegung dieses hilfreiche Rauschen ins System ein.

Wenn viele gleiche Individuen zusammen einen Schwarm oder eine Herde bilden sollen, die nicht an einem Ort bleiben – also im Gegensatz zu einem Mückenschwarm oder einem Auto- oder Fußgängerstau – sondern sich als Ganzes fortbewegen können, dann müssen sie sich alle so abstimmen, dass sie sich in die gleiche Richtung bewegen, ohne dass es einen Anführer oder ein Leittier gibt. Gleichzeitig würde sich aber jedes Individuum von selbst leicht erratisch und ungerichtet vorwärtsbewegen wie ein aktives Brownsches Teilchen (siehe „Aktive Brownsche Teilchen“). Wie kommt es also zur gemeinsamen Ausrichtung? Ein vereinfachtes Simulationsmodell zur Beantwortung dieser Frage hat der ungarische Physiker Tamas Vicsek 1995



**Abb. 5** Die Jagd auf Viren: Bei Grippeinfektionen legen weiße Blutkörperchen (Neutrophile, rosa) Spuren (CXCL12) ab, die den CD8<sup>+</sup>-Killer-Zellen einen effizienten Weg zu den Viren im infizierten Gewebe weisen (aus [7], Nachdruck mit Genehmigung von AAAS).

vorgeschlagen [9]: Jedes Teilchen bewegt sich für eine kurze Zeit  $t_0$  geradlinig mit fester Geschwindigkeit  $v_0$ . Dann sammelt es Informationen über die Bewegungsrichtungen aller seiner Nachbarn in einem bestimmten Umkreis und passt seine eigene Bewegungsrichtung dem Mittelwert der Nachbarn an – bis auf das schon erwähnte Bisschen an erratischer Abweichung.

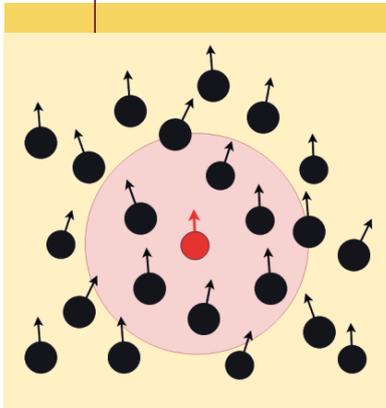
Wenn dieses Modell für viele aufeinanderfolgende Zeitschritte  $t_0$  simuliert wird, dann ergeben sich zwei Phasen: eine ungeordnete Phase bei geringer Teilchendichte, also wenigen Nachbarn, und stark erraticem Verhalten – mit Gewimmel wie in einem Ameisenhaufen – und eine Phase gemeinsamer gerichteter Bewegung bei hoher Teilchendichte, vielen Nachbarn und wenig erratic Bewegung. Die gemeinsame gerichtete Bewegung kommt also durch

die Anpassung an das Verhalten der Nachbarn zustande und verstärkt sich gegenseitig (Abbildung 6).

Die gemeinsame Ausrichtung der Bewegung ist aber nur ein Aspekt bei der Schwarmbildung. Tatsächlich müssen drei verschiedene Strategien zusammenkommen: ein gegenseitiges Ausweichen von Individuen, eine parallele Ausrichtung der Bewegung in der unmittelbaren Nachbarschaft wie im Vicsek-Modell sowie eine Bewegung zum Zentrum des Schwarms hin von Individuen, die am Rand sind oder gar den Schwarm verlassen haben [6, 8].

Ein solches Modell hat der Software-Ingenieur Craig Reynolds bereits in den 1980er-Jahren vorgeschlagen.

**ABB. 6** VICSEK-MODELL



Ein Teilchen (dunkelrot) passt seine Bewegungsrichtung dem Mittelwert der Richtungen seiner Nachbarn im definierten Interaktionsbereich (hellrot) an.

Eine detaillierte Simulation einer physikalischen Version dieses Modells ergibt folgende Vorhersagen [8]: Für die Bildung beweglicher Schwärme muss die parallele Ausrichtung stark genug sein, sonst bilden sich kompakte Zusammenballungen – wie bei Staus. Diese Form solcher Schwärme ist nicht kreisförmig, sondern sie sind stark in die Länge gezogen (Abbildungen 4b und d). Der Schwarm bewegt sich meist relativ geradlinig, es kommt aber immer wieder zu starken Richtungswechseln, die vom vorderen Teil des Schwarms ausgehen, während die hinteren Teile einfach der „ausgetretenen Spur“ ihrer Vorgänger folgen [8]. Bei diesen Richtungswechseln kann es dazu kommen, dass der Schwarm sich selbst „in den Schwanz beißt“, das heißt, dass der Schwarm eine ringförmige Konfiguration annimmt (Abbildungen 4a und c). Tatsächlich werden solche ringförmigen Strukturen in vielen Tiergruppen beobachtet, zum Beispiel bei Rentieren, Feuerameisen und Fischen.

### Ausblick: Mikroroboter und Schwarmintelligenz

Eine wichtige Motivation für die theoretischen Untersuchungen der Bewegung von Mikroschwimmern und der Bedingungen für die Bildung von Schwärmen ist die Entwicklung von Mikro- und Makrorobotern, die solches Schwarmverhalten zeigen. Hier hat die Entwicklung von Mikrorobotern mit einer typischen Größe im Zentimeterbereich große Fortschritte gemacht [10]. Je kleiner die Roboter werden, desto schwieriger wird es aber, Sensoren, Aktuatoren und Prozessoren zur Informationsverarbeitung unterzukriegen. Numerische Simulationen der Modelle, wie wir sie hier vorgestellt haben, können helfen, die notwendigen Fähigkeiten vorab zu bestimmen.

Eine interessante Alternative – bis zur fertigen Entwicklung von Mikrorobotern – für die experimentellen Untersuchung des Schwarmverhaltens sind kolloidale Suspensionen, bei denen eine externe Kamera das System beobachtet und ein externer Computer dann per Laserstrahl jedes einzelne Kolloidteilchen so steuert, als ob es ein eigenständiger Mikroroboter wäre [11].

In ähnlicher Weise bieten biohybride Mikroschwimmer eine Möglichkeit zur gezielten Medikamentenabgabe und Krebstherapie. Bei dieser Kategorie von Methoden wird ein Antriebsmechanismus verwendet, der entweder auf synthetischen Nanopartikeln, gesteuert über magnetische [12] oder lichtinduzierte Kräfte, oder auf biologischen Mikroschwimmern – „eingefangenen“ Bakterien – basieren kann. Zudem können biokompatible Träger wie weiße oder rote Blutkörperchen, Leukozyten oder Erythrozyten, verwendet werden, die wünschenswerte biologische Eigenschaften beitragen können. Die bisher noch überschaubare experimentelle Forschung zu *In-vivo*-Anwendungen unterstreicht die Notwendigkeit von Simulationen als wertvolle Ausgangsbasis für das Verständnis und die Konzeption solcher Mikrobots.

Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile: Diese von Aristoteles in seiner *Metaphysik* ausführlicher formulierte Erkenntnis findet ihre beste Veranschaulichung im

kollektiven Verhalten von Lebewesen wie Ameisen, Bienen und Fischen, neben vielen anderen Beispielen. Während ein einzelnes Lebewesen eine relativ begrenzte Intelligenz aufweist und nur nach einer Handvoll „Regeln“ interagiert, ist der Schwarm als Ganzes in der Lage, komplexe Aufgaben wie Navigation, Nahrungssuche, Vermeidung von Raubtieren und Optimierung von Ressourcennutzung zu bewältigen.

Das Verständnis dafür, wie einfache, lokale Interaktionen zu emergentem, selbstorganisiertem Verhalten führen können, hat in den letzten Jahrzehnten großes Interesse geweckt. Es führte zu Anwendungen in verschiedenen Bereichen, darunter Netzwerkdesign, Schwarmrobotik, Finanzprognosen und Lieferkettenmanagement. Dies hat die Entwicklung von theoretischen und Simulationsmodellen vorangetrieben, die zum Verständnis der physikalischen Grundlagen der Informationsausbreitung und der kollektiven Bewegung in Schwärmen beitragen können. Für die Mikroschwimmer ist die umgebende Flüssigkeit von großer Bedeutung, da sie zum Antrieb, für die Steuerung und Richtungsänderung und für die Wechselwirkung an den Wänden mit anderen Mikroschwimmern wichtig ist.

### Zusammenfassung

Wie schwimmen Mikroorganismen in einer meist wässrigen Umgebung? Für sie erweist sich Wasser als so zähes Medium, dass sie nach einer Schwimmbewegung nicht weitergleiten. Ursache ist eine geringe Trägheit im Verhältnis zu einer relativ hohen Viskosität. Unter den Mikroorganismen gibt es im Wesentlichen zwei Typen: Pusher besitzen ihren Antrieb am Hinter-, Puller am Vorderende. Auch das Schwarmverhalten von Mikroschwimmern wird teilweise durch die Gesetze der Mikrowelt bestimmt. So können sie die Brownsche Molekularbewegung aktiv zum Ansteuern eines Ziels nutzen. Doch es gibt auch viele Ähnlichkeiten mit dem Schwarmverhalten größerer Teilnehmer. Wie Massenkarambolagen beim Autoscooter oder Staus gibt es auch unter Bakterien das Phänomen der bewegungsinduzierten Aggregation. Ein Forschungsfeld ist die Simulation des Schwarmverhaltens, für das auch die Erkennung der Umgebung und Selbstadaption der Bewegung wichtig sind. Diese Simulationen sind für viele medizinische und technische Anwendungen interessant, zum Beispiel für den Transport medizinischer Wirkstoffe im Körper.

### Stichwörter

Mikroschwimmer, Flagellen, Zilien, Motorproteine, Mikro-roboter, intelligente aktive Brownsche Teilchen, Viskosität, hydrodynamische Wechselwirkung, bewegungsinduzierte Aggregation, Vicsek-Modell, Schwärme.

### Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

### Literatur

- [1] B. Friedrich, U. B. Kaupp, *Physik in unserer Zeit* **2011**, 42(2), 196.
- [2] J. Elgeti, R. G. Winkler, G. Gompper, *Rep. Prog. Phys.* **2015**, 78(5), 056601.
- [3] M. E. Cates, J. Tailleur, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **2015**, 6(1), 219.
- [4] P. Iyer et al., *Phys. Rev. Res.* **2023**, 5(3), 033054.
- [5] K. Qi et al., *Commun. Phys.* **2022**, 5(1), 49.
- [6] I. D. Couzin et al., *Nature* **2005**, 433, 513.
- [7] K. Lim et al., *Science* **2015**, 349 (6252), aaa4352.
- [8] R. S. Negi et al., *Phys. Rev. Res.* **2024**, 6(1), 013118.
- [9] T. Vicsek, A. Zafeiris, *Phys. Rep.* **2012**, 517(3-4), 71.
- [10] T. Y. Huang, H. Gu, B. J. Nelson, *Annu. Rev. Control Robot. Auton. Syst.* **2022**, 5, 279.
- [11] F. A. Lavergne et al., *Science* **2019**, 364(6435), 70.
- [12] J. Rahmer, B. Gleich, *Phys. Unserer Zeit* **2018**, 49(3), 124.

### Die Autoren



**Priyanka Iyer** absolvierte ihr Physikstudium in Delhi und Köln. Sie schloss ihr Masterstudium in Physik 2021 ab und war Stipendiatin der Graduiertenschule für Physik und Astronomie Bonn-Köln. Seit 2022 promoviert sie am Forschungszentrum Jülich und beschäftigt sich mit der Erforschung intelligenter aktiver Materiesysteme. Ihr Forschungsinteresse gilt vor allem der Modellierung des emergenten kollektiven Verhaltens dieser Systeme.



**Gerhard Gompper** ist Wissenschaftlicher Direktor am Institute of Biological Information Processing und am Institute for Advanced Simulation des Forschungszentrum Jülich. Er ist zudem Professor für Theoretische Physik an der Universität zu Köln. Seine Arbeitsgebiete sind Hydrodynamik komplexer Flüssigkeiten, aktive Materie und intelligente Systeme. Er war 2013–2020 Sprecher des DFG-Schwerpunktprogramms „Microschwimmers“.

#### Anschrift

Prof. Dr. Gerhard Gompper, Institute of Biological Information Processing and Institute for Advanced Simulation, Forschungszentrum Jülich, D-52425 Jülich. g.gompper@fz-juelich.de, p.iyer@fz-juelich.de