

TEILCHEN

TANZ

DER

TANZ DER TEILCHEN

# PHYSIK DER AKTIVEN MATERIE

ULRICH SCHWARZ

**Zelluläre Agentenschärme, die sich selbst organisieren und im Körper gezielt Reparaturen ausführen oder Krebszellen vernichten? Aktiv agierende Materialien, die unablässig Arbeit verrichten und sich nach Störungen eigenständig reorganisieren? Was nach Science Fiction klingt, sind denkbare Anwendungen einer „Physik der aktiven Materie“ – ein noch junges Forschungsgebiet zwischen Physik, Biologie und Materialwissenschaften, auf dem auch an der Universität Heidelberg innovativ geforscht wird.**

# B

Betrachtet man Mikroorganismen wie Bakterien oder Algen unter dem Mikroskop, wird eine unglaubliche Bewegungsvielfalt sichtbar. Naturforscher waren davon schon immer fasziniert – seit Erfindung der ersten Mikroskope im 17. Jahrhundert. Und schon mit den allerersten dieser Beobachtungen gingen grundlegende Fragen einher: Sind diese Bewegungen aktiv oder passiv? Verbrauchen sie Energie oder finden sie einfach „von sich aus“ statt?

#### Browns Entdeckung

Nicht nur biologische Zellen, sondern auch andere Teilchen, die sich mit dem Mikroskop beobachten lassen, sind ständig in Bewegung. Einer der ersten Wissenschaftler, der sich über diese Aktivitäten Gedanken machte, war der schottische Botaniker Robert Brown. Er veröffentlichte im Jahr 1828 eine Abhandlung unter dem Titel „A brief account of micro-

scopical observations (...) on the particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies“. In seinem Beitrag beschreibt Brown zunächst, was er mit seinem Mikroskop bei Pflanzensamen beobachtet hatte: „While examining the form of these particles immersed in water, I observed many of them very evidently in motion. (...) These motions were such as to satisfy me, after frequently repeated observations, that they arose neither from currents in the fluid, nor from its gradual evaporation (convection), but belonged to the particle itself.“ Anschließend schildert Brown, dass er die gleiche, nie endende Zitterbewegung auch bei anderen mikroskopisch kleinen Teilchen beobachten konnte, etwa bei fein zerteilten Mineralien, die sicherlich nicht lebendig sind.

Um seine Entdeckung zu beschreiben, nutzte Brown den Begriff „active particle“, aktive Teilchen. Im Jahr 1866 stellte er allerdings in einer weiteren Veröffentlichung klar: „I have to notice an erroneous assertion of more than one writer, namely that I have stated the active molecules (i.e. particles) to be animated“. Er wollte also vermeiden, dass seine „aktiven Teilchen“ als belebt verstanden werden. Seine Beobachtungen und die von ihm gewählte Bezeichnung „aktiv“ legen dennoch folgende Überlegung nahe: Könnte es im Bereich der mikroskopisch kleinen Teilchen eine Energiequelle für aktive Kräfte geben, die Teilchen in ständiger Bewegung hält?

Browns Entdeckung ist heute als „Brownsche Molekularbewegung“ bekannt. Sie bezeichnet die andauernde, ungeordnete Zitterbewegung von mikroskopisch kleinen Teilchen, die in einer Flüssigkeit oder einem Gas gelöst sind. Für den weiteren Verlauf der Physik, aber auch für viele andere Wissenschaftsgebiete wie Mathematik oder Wirtschaftswissenschaften hat Browns Entdeckung eine enorm wichtige Rolle gespielt. Tatsächlich nehmen wir auch im Alltag und ohne Mikroskop ähnliche Prozesse wahr, beispielsweise Staubflusen, die im Sonnenlicht tanzen, oder Fettröpfchen, die in der Milch schwimmen. Und wenn man sich nicht sicher ist, welche Kraft hinter dieser Bewegung steckt, neigt man wie in den Zeiten von Robert Brown oft dazu, diese Bewegungen „aktiv“ oder gar „lebendig“ zu nennen.

#### Einstiens Antwort

Die zentrale Frage ist: Wie kann man entscheiden, ob ein sich bewegendes Teilchen aktiv oder passiv ist? Aus Sicht der Physik hat Albert Einstein darauf im Jahr 1905 eine Antwort gegeben. In diesem „annus mirabilis“ veröffentlichte Einstein drei Arbeiten – jede für sich revolutionierte die Physik.

Neben der speziellen Relativitätstheorie und der Erklärung des Photoeffekts der Quantenmechanik publizierte er in diesem „Wunderjahr“ auch seine Schrift „Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“. Darin erläutert Einstein folgenden Zusammenhang: Ein passives Teilchen sollte in einer Flüssigkeit in ständiger Bewegung sein, weil es dauernd mit Molekülen des Lösungsmittels zusammenstößt. Diese Moleküle tragen Bewegungsenergie, was auf den Temperaturbegriff der damals noch im Entstehen begriffenen Statistischen Physik zurückgeht. Er bedeutet für Flüssigkeiten: Bei endlicher Temperatur ist in einem System immer auch endliche Bewegungsenergie vorhanden.

Der eigentliche Durchbruch aber war, dass Einstein daraus mittels neuartiger Mathematik eine theoretische Vorhersage machen konnte, die sich später experimentell bestätigen ließ: Der typische Abstand  $x$  des passiven Teilchens vom Ursprung sollte genau mit der Quadratwurzel des Produkts von Temperatur  $T$  und Zeit  $t$  ansteigen, also  $x \propto \sqrt{Tt}$ . Diese Art von Bewegung ist heute als „Irrfahrt“ (Random walk), als „Zufallsprozess“ (Random process) oder als „Diffusion“ bekannt.

#### Sonderforschungsbereich 1129

Der Sonderforschungsbereich „Integrative Analyse der Replikation und Ausbreitung pathogener Erreger“ (SFB 1129) untersucht die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen Erreger- und Wirtsorganismen, die zur Vermehrung und Ausbreitung oder aber zur Hemmung einer Infektion führen. Dabei geht es um die Berücksichtigung der unterschiedlichen Komplexitätsebenen und Größenordnungen, die für den Infektionsvorgang relevant sind. Langfristig sollen in der Zusammenführung unterschiedlicher Disziplinen neue Methoden zur Krankheitskontrolle entwickelt werden. Koordiniert wird der Sonderforschungsbereich an der Medizinischen Fakultät Heidelberg. Neben Forscher:innen aus der Infektiologie sind Wissenschaftler:innen der Bereiche Physik, Chemie, Biowissenschaften und Ingenieurwissenschaften der Universität sowie des European Molecular Biology Laboratory (EMBL), des Max-Planck-Instituts für medizinische Forschung und des Deutschen Krebsforschungszentrums (DKFZ) beteiligt. Sprecher des SFB ist Prof. Dr. Hans-Georg Kräusslich.

Der Sonderforschungsbereich 1129 ist ein wichtiges Vorläuferprojekt des neu bewilligten Exzellenzclusters SynthImmune, der im Januar 2026 seine Arbeit aufnehmen wird. In dessen Rahmen werden Wissenschaftler:innen mit einem ähnlichen interdisziplinären Ansatz daran arbeiten, mit Methoden der synthetischen Biologie und der Materialwissenschaften neue Therapien gegen Infektionskrankheiten und Krebs zu entwickeln.

[www.sfb1129.de](http://www.sfb1129.de)

Nach Einstein ist es die thermisch angeregte Diffusion, die bestimmt, wie sich mikroskopisch kleine Teilchen in Flüssigkeiten bewegen.

Die Abhängigkeit des Abstandes von der Quadratwurzel der Zeit bedeutet zwar, dass diese Art von Bewegung keine Sprünge machen kann, aber sie sagt auch voraus, dass die Bewegung ihre Geschwindigkeit sehr schnell ändern kann. Die Teilchen sind also in einem Moment sehr langsam und in

**„Die Brownsche Bewegung mikroskopisch kleiner Teilchen ist ein passiver Prozess, der zustande kommt, weil sie ständig mit den Molekülen ihrer Umgebung zusammenstoßen.“**

# BIOPHYSIK

einem anderen sehr schnell – genau so, wie Robert Brown es unter dem Mikroskop beobachtet hat. Die Abhängigkeit des Abstandes von der Quadratwurzel der Temperatur bedeutet außerdem, dass sich mit quantitativen Experimenten der thermische Ursprung der Bewegung nachweisen lässt.

Einstins Überlegungen wurden von dem französischen Physiker Jean-Baptiste Perrin relativ schnell experimentell bestätigt. Mithilfe des Diffusionsgesetzes gelang es Perrin, für die Brownsche Bewegung die „Avogadro-Konstante“ zu bestimmen, also die Tatsache, dass es in einem Gramm elementaren Wasserstoff immer  $6 \times 10^{23}$  Atome gibt. Damit war nun endgültig klar: Die Materie ist aus Atomen und Molekülen aufgebaut. Für diese Einsicht erhielt Jean Perrin im Jahr 1926 den Nobelpreis für Physik.

## Passive Teilchen

Was bedeuten die Erkenntnisse von Einstein und Perrin für die Frage „aktiv oder passiv“? Sie bedeuten, dass die Brownsche Bewegung mikroskopisch kleiner Teilchen ein passiver Prozess ist, der zustande kommt, weil sie ständig mit den Molekülen ihrer Umgebung zusammenstoßen. Die Energie dafür wird von der Bewegungsenergie der Umgebungsmoleküle bereitgestellt, was einer endlichen Temperatur entspricht. Solange die Umgebung auf einer konstanten Temperatur gehalten wird, wird diese Art von Bewegung immer existieren, ohne dass sie sich abschwächt.

Dafür gibt es zwei Voraussetzungen: Die Teilchen dürfen nicht zu groß und nicht zu klein sein. Sind sie zu groß und zu schwer, können sie durch die Stöße nicht in Bewegung versetzt werden, sind sie zu klein, können sie nicht von vielen Umgebungsmolekülen getroffen werden. Diese Voraussetzungen werden am besten von „Kolloiden“ erfüllt, Mikrometer kleinen Teilchen, die in Flüssigkeiten gelöst sind – mithin genau die Art von Teilchen, die Brown unter dem Mikroskop beobachtet und Perrin für seine Experimente benutzt hat.

Diese Gesetzmäßigkeiten treffen aber auch für große Moleküle zu, beispielsweise für Proteine in biologischen Zellen. Für physikalische Systeme wie Kolloide und große Moleküle ist das Konzept „aktiv“ deshalb zunächst nicht relevant, und die Physik hat sich als Domäne der „passiven“ Prozesse etabliert. Die am Ende des 19. Jahrhunderts aufkommenden Gebiete „Thermodynamik“ und „Statistische Physik“ machten neue Konzepte und Methoden verfügbar, die verstehen lassen, wie die Umgebungstemperatur das Verhalten physikalischer Systeme bestimmt, ohne dazu aktive Komponenten zu benötigen.

## Biologische Systeme

Während also die Physik die „aktiven Teilchen“ von Brown als passiv erklären konnte, ist in der Biologie klar: Leben ist ohne Aktivität im Sinne von Energie, die aus dem Stoffwechsel (Metabolismus) gewonnen wird, nicht möglich. Auch hierfür kommt die Begründung letztendlich aus Thermodynamik und

Statistischer Physik: Ohne äußeren Eintrag von Energie wird jedes physikalische System in einen Zustand der scheinbaren Ruhe kommen, in ein „thermodynamisches Gleichgewicht“. In diesem Zustand ist Bewegung aufgrund der endlichen Temperatur zwar immer noch möglich – es kann aber keine Arbeit mehr geleistet werden.

Auch in der Biologie gibt es durchaus Systeme, die imstande sind, für eine gewisse Zeit ohne metabolische Energie und Arbeit auszukommen, etwa Viren und die Sporen von Bakterien oder Pflanzen. Dann aber ist keine Fortpflanzung mehr möglich, die ja das Wesen der Biologie ausmacht. Um die Kraft zu erzeugen, die für Bewegungen oder für die Teilung von Zellen erforderlich ist, muss ein biologisches System notgedrungen

## Max Planck School Matter to Life

Was genau ist Leben aus physikalisch-chemischer Sicht? Können lebensähnliche Prozesse, Funktionen und Objekte im Labor simuliert werden? Wie können aus Molekülen und Materialien lebensähnliche Systeme gebaut werden, die in ihren Funktionen Zellen, Zellnetzwerken und Organismen ähneln? Diesen grundlegenden Fragen widmet sich die Max Planck School Matter to Life, ein gemeinsames Forschungs- und Ausbildungsnetzwerk universitärer und außeruniversitärer Partner, in dem es darum geht, die Bausteine lebender Systeme zu verstehen, um mit Ansätzen aus der Physik, der Chemie, den Ingenieur- und den Lebenswissenschaften langfristig neue lebensähnliche Prozesse und Systeme zu entwickeln und zu konstruieren.

Dem Netzwerk gehören die Universitäten Heidelberg und Göttingen als Lehruniversitäten sowie mehrere Max-Planck-Institute, darunter das Heidelberger MPI für medizinische Forschung, an, zudem weitere Hochschulen und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen wie das Deutsche Krebsforschungszentrum Heidelberg. Seit 2025 werden die Max Planck Schools von der Dieter Schwarz Stiftung substanzell unterstützt, die die frühere Projekt-Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft in eine dauerhafte Finanzierung überführt.

Das forschungsnahen Ausbildungsprogramm steht Bachelor-Absolvent:innen aus den Fachbereichen Chemie, Physik, Biologie, Biochemie, Biotechnologie und Materialwissenschaften offen, die bereits im Laufe des Studiums eigenständige Forschungsprojekte verfolgen können. Nach erfolgreich abgeschlossener Masterarbeit können sie ihre Labortätigkeit während eines Doktorandenstudiums fortsetzen.

<https://mattertolife.maxplanckschools.org>

Energie verwenden, die aus der Nahrung gewonnen wird. Andernfalls wäre es ein passives (totes) System, das nicht fähig ist, sich entsprechend der Regeln von Darwins Evolutionstheorie mittels Vermehrung und genetischer Veränderungen (Mutationen) an die Umgebung anzupassen.

#### Biologische Zellen als aktive Teilchen

Die Aktivität biologischer Zellen ist nicht zu übersehen, wenn man sie unter dem Mikroskop beobachtet. Genau das hat Robert Brown wahrscheinlich dazu motiviert, die von ihm beobachtete Bewegung als „aktiv“ zu bezeichnen. Heute verbindet man aber mit „aktiven Teilchen“ immer einen Energieumsatz. Während Bakterien, Algen und Spermien typischerweise einen drehenden oder schlagenden Fortsatz, ein „Flagellum“, verwenden, um zu schwimmen, bewegen sich die meisten Tierzellen auf Oberflächen, indem sie ihre Form ändern. Alle diese Prozesse benötigen Energie. Sie wird in Form von Adenosintriphosphat, kurz ATP, bereitgestellt, ein kleines Molekül, das während des Stoffwechsels erzeugt wird. Ein Mensch verbraucht im Laufe eines Tages etwa so viel ATP, wie er selbst wiegt. Da ATP aber kontinuierlich erzeugt und verbraucht wird, ändert sich die eigene Masse nicht.

Auch viele andere Prozesse im Innern von Zellen benötigen Energie. Ein Beispiel sind Musterbildungsprozesse, die einem Bakterium dazu verhelfen, seine Mitte zu finden, dort, wo es sich teilen soll. Solche Prozesse lassen sich mit dynamischen Gleichungen beschreiben, die auch außerhalb des thermodynamischen Gleichgewichts gültig sind. Eine wichtige Grundannahme dabei ist es, dass sich alle Reaktionspartner innerhalb der Zelle schnell finden und miteinander reagieren können. Dafür braucht es aber keine Energiequellen, hierfür

sind die von Einstein mitbegründeten Diffusionsgesetze vollkommen ausreichend. Letztendlich ist also biologische Aktivität nur möglich, weil sie auf den passiven Gesetzen der Physik, speziell auf der Brownschen Bewegung, aufbauen.

#### Die neue Physik der aktiven Teilchen

Für lange Zeit waren also die Begriffe „aktiv“ und „passiv“ in der Beschreibung biologischer Systeme sehr gut getrennt. Es war klar, welche Aspekte damit jeweils beschrieben werden: Ein biologisches System ist aktiv, weil es metabolische Energie verwendet, beispielsweise um sich zu bewegen; die zugrunde liegenden physikalischen Aspekte wie die Brownsche Bewegung hingegen haben einen passiven Charakter.

Diese Situation änderte sich im Jahr 1995 grundlegend. Damals beschrieb der ungarische Physiker Tamás Vicsek ein theoretisches Modell für das Schwarmverhalten von Vögeln. Vicseks Hauptidee: Jeder Vogel im Schwarm bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit, ist also ein Teilchen mit aktiver Bewegung. Weiterhin kann ein Vogel nur die Vögel in seiner unmittelbaren Nachbarschaft wahrnehmen und die Richtung der Bewegung nur an diesen unmittelbaren Nachbarn ausrichten. Das Vicsek-Modell zeigt mathematisch, dass diese lokale Regel zu einem plötzlich auftretenden neuen, einem „emergenten“ Schwarmverhalten führt, das dem Verhalten von Zugvögeln ähnelt, die sich für den Flug nach Süden über den Feldern sammeln. Obwohl dieses Verhalten einige Eigenschaften mit statistischen Modellen für Magneten teilt, die als emergentes Verhalten strukturelle Phasenübergänge zeigen, geht es in der damit begründeten Modellklasse um vollkommen neue Phänomene: um ein emergentes Verhalten in dynamischen Zuständen von aktiven Teilchen.



**PROF. DR. ULRICH SCHWARZ** leitet die Arbeitsgruppe „Physik komplexer Biosysteme“ am Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg. Seine Arbeitsgebiete sind die Statistische Physik, die Physik der weichen Materie und die theoretische Biophysik; er gehört verschiedenen Heidelberger Initiativen an den Schnittstellen zwischen Physik, Mathematik, Biologie und Materialwissenschaften an, insbesondere dem SFB 1129, den Exzellenzclustern STRUCTURES, 3DMM2O und SynthImmune sowie der Max-Planck-Schule Matter to Life. Nach dem Studium der Physik in Freiburg, Baltimore (USA) und München wurde Ulrich Schwarz 1998 am Potsdamer Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung promoviert. Es folgte ein Forschungsaufenthalt am Weizmann-Institut in Israel, anschließend leitete er eine Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe der Deutschen Forschungsgemeinschaft. 2008 wurde Ulrich Schwarz als Professor für Theoretische Biophysik an das KIT in Karlsruhe berufen, ein Jahr später folgte der Ruf an die Universität Heidelberg.

Kontakt: schwarz@thphys.uni-heidelberg.de

**„Mit ‚aktiver Materie‘ werden Ensembles von Objekten bezeichnet, von denen jedes für sich ein Energiereservoir verwendet, um daraus Kräfte und Bewegung zu erzeugen.“**

DANCE OF THE PARTICLES

# PHYSICS OF ACTIVE MATTER

ULRICH SCHWARZ

Matter is made up of atoms and molecules that move even in a state of thermodynamic equilibrium, as long as temperature is finite. This phenomenon was first observed by the Scottish botanist Robert Brown with the aid of a microscope and later explained by Albert Einstein. The required kinetic energy is provided by the thermal environment. This is therefore a passive effect.

In the physics of active matter, researchers take inspiration from biological systems, which use local energy sources to generate forces and movements that are not possible in a state of thermodynamic equilibrium. As a result, single particles can move more efficiently than by diffusion and swarms of active particles are able to assume completely new dynamic states.

Examples include molecules that form self-organized patterns in space and time, biological cells moving collectively through tissue, or so-called phoretic particles that could be used as autonomous agents for targeted interventions in the body. ●

PROF. DR ULRICH SCHWARZ heads the research group "Physics of Complex Biosystems" at Heidelberg University's Institute for Theoretical Physics. His research interests are statistical mechanics, soft matter physics and theoretical biophysics; he is a member of various Heidelberg initiatives at the intersection between physics, mathematics, biology and materials science, in particular CRC 1129, the Clusters of Excellence STRUCTURES, 3DMM20 and SynthImmune, and the Max Planck School Matter to Life. Ulrich Schwarz studied physics in Freiburg, Baltimore (USA) and Munich and earned his doctorate at the Max Planck Institute of Colloids and Interfaces in Potsdam in 1998. He held a research position at the Weizmann Institute in Israel and went on to head an Emmy Noether junior research group of the German Research Foundation. In 2008 Ulrich Schwarz was appointed Professor of Theoretical Biophysics at the KIT in Karlsruhe; he transferred to Heidelberg University in the following year.

Contact: schwarz@  
thphys.uni-heidelberg.de

**"The term 'active matter' refers to ensembles of objects that use an energy reservoir to generate forces and movement."**

Die aus solchen Modellen resultierenden Bewegungen ähneln zwar den Irrfahrten von Brownschen Teilchen. Sie sind aber letztendlich anders, weil sie auf Bewegungsenergie beruhen, die nicht aus der thermischen Umgebung, sondern aus lokalen Energiequellen kommt; insbesondere verändert sich die Entfernung  $x$  nicht mehr mit der Quadratwurzel der Temperatur  $T$ . Anders als in der traditionellen Physik gilt auch nicht mehr die sogenannte Zeitumkehrinvarianz: Filmt man einen solchen Prozess und spielt ihn rückwärts ab, zeigt er andere Eigenschaften als in der Vorwärtsrichtung. Während bei passiven Teilchen nach Einstein die Umgebungstemperatur die Bewegung erzeugt, wird diese Rolle jetzt von den Energiedepots der aktiven Teilchen übernommen.

Aufbauend auf den Erkenntnissen des Vicsek-Modells hat sich sehr schnell ein neues und relativ eigenständiges Forschungsgebiet zwischen Physik, Biologie und Materialwissenschaften entwickelt, die „Physik der aktiven Materie“ („active matter physics“). Mit „aktiver Materie“ wird heute ein Ensemble von Objekten bezeichnet, von denen jedes für sich ein Energiereservoir verwendet, um daraus Kräfte und Bewegung zu erzeugen. Aufgrund der kontinuierlichen Aufnahme von Energie kann das System das thermodynamische Gleichgewicht vermeiden und Prozesse aufrechterhalten, die in einem passiven System nicht möglich wären, etwa nie endende Kreisprozesse, die Arbeit verrichten, oder raumzeitliche Muster, die sich nach Störungen immer wieder neu herausbilden. Beispiele für solche Strukturbildungen in aktiver Materie sind die Bewegungen von Zellen während der Entwicklung eines Organismus, während der Heilung von Wunden oder bei der Metastasierung, also der Bildung von Tochtergeschwulsten bei einer Krebskrankung. Weitere Exempel sind koordinierte Bewegungen von Vögeln, Fischen oder Menschen in Schwärmen.

### Anwendungsmöglichkeiten

Ein in Heidelberg intensiv erforschter, medizinisch relevanter Bereich für die Anwendung aktiver Systeme sind Malaria-parasiten, die bei der Blutmahlzeit infizierter Moskitos in die Haut von Menschen gelangen. Von dort aus machen sich die Parasiten auf die Suche nach Blutgefäßen, um in die Leber vorzudringen, wo sie ihren Vermehrungszyklus beginnen. Mit Hilfe der Physik aktiver Materie ist es unserer Forschergruppe in Heidelberg gelungen, diesen Prozess auf mehreren Ebenen zugleich zu analysieren. Dabei konnten wir zeigen, welche besondere Rolle die merkwürdig gekrümmte Form der Parasiten spielt.

Auf Ebene der Moleküle konnten wir nachweisen, wie raumzeitliche Selbstorganisation zu einem stabilen Strom an der Oberfläche des Parasiten führt. Auf der Ebene der Zellen konnten wir demonstrieren, dass ein aktiver Prozess in der Rotation zu der experimentell beobachtbaren schnellen Verteilung der Parasiten in der Haut führt. Und bei der Be-trachtung des Verhaltens vieler Parasiten konnten wir die

Bewegung von Parasitengruppen nach Öffnen der Speichel-drüsen der Moskitos als neuartiges Schwarmverhalten aktiver chiraler Teilchen beschreiben, die sich durch Drehung oder Verschiebung aktiv räumlich anordnen. Ein derart de-tailiertes Verständnis der zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen könnte neue therapeutische Wege erschließen, etwa um die am Anfang jeder Malariaerkrankung stehende Bewegung und Wanderung der Parasiten mit geeigneten Wirkstoffen zu stören.

Motiviert durch die Physik der aktiven Materie lässt sich eine weitere Anwendungsfrage stellen: Könnte man entsprechende Phänomene auch mit physikalischen Modellsystemen nach-bauen? Hierfür würden sich Teilchen anbieten, die sich in einem selbsterzeugten Gradienten bewegen. Dafür könnte man sogenannte Janus-Teilchen verwenden, Kolloide, deren eine Seite mit Metall überzogen ist: Der Metallteil kann eine chemische Reaktion katalysieren, die zu einem Fluss auf die andere Seite des Teilchens führt und dabei das komplette Teilchen nach vorne treibt.

Für runde Kolloide ist das bereits etabliert. Jetzt müsste man das auch noch für gebogene Formen realisieren, um die helikalen Trajektorien zu erhalten, die für Malaria-parasiten charakteristisch sind. Ließe sich dieses System so gestalten, dass es sich aktiv durch dichte Umgebungen bewegt, hätte man eine ähnliche Situation wie bei den Malaria-parasiten, die räumlich koordiniert durch die Haut gleiten. Es mag zwar derzeit noch nach Science Fiction klingen, im Prinzip aber ist es vorstellbar, dass man solche Systeme als „autonome Agentenschwärm“ einsetzt, die im Körper gezielt Reparaturen ausführen oder Krebszellen bekämpfen.

Eine andere, derzeit schon realistischer erscheinende Anwendung der Physik der aktiven Materie ist das Design von aktiven Materialien, die mit lokalen Energiequellen konti-nuierlich Arbeit verrichten oder sich nach Störungen wieder selbst organisieren. In Heidelberg wird speziell an der Kom-bination mit dreidimensionalen Druckverfahren geforscht, die es erlauben, neuartige Materialien in ungewöhnlichen Geometrien anzugeben. Mit mathematischen Modellen kann dann vorhergesagt werden: Welche Geometrien müssen gedruckt werden, um bestimmte Arten von Verformungen zu erhalten? Und wie müssen die dafür nötigen Energiequellen gesteuert werden, um dynamische Muster nach Wunsch zu erzeugen? ●