

Mikroboote kommen in Fahrt

So manche medizinische Behandlung wäre effizienter, wenn Medikamente mit einem winzigen Roboter direkt zum Krankheitsherd transportiert werden könnten. **Peer Fischer** und seine Mitarbeiter am Stuttgarter **Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme** entwickeln Mikro- und Nanoschwimmer, die dies eines Tages ermöglichen sollen.

TEXT **KARL HÜBNER**

Es ist ein einfaches DIN-A4-Blatt, das neben der Labortür hängt: „Bitte nicht sauber machen.“ Das Reinigungspersonal dürfte sich freuen. Und die Nutzer des Labors sind viel entspannter, denn sie wissen: Wenn niemand Gegenstände herumräumt und über die Tische wischt, kann auch nichts Wichtiges abhandenkommen. So ist das, wenn sich Forscher mit Gegenständen beschäftigen, die mit dem bloßen Auge gar nicht zu erkennen sind. Daher schützt die Arbeitsgruppe „Mikro-, Nano- und Molekulare Systeme“ am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme in Stuttgart zumindest eines ihrer Labore auf die genannte Weise.

Geleitet wird die Gruppe von Peer Fischer, der auch Professor an der Universität Stuttgart ist. Seine Forschung hat in den vergangenen Jahren einen kleinen Fuhrpark an Miniaturvehikeln hervorgebracht – Strukturen aus dem Mikro- oder sogar Nanokosmos, die sich auf die eine oder andere Weise gezielt

durch Flüssigkeiten bewegen können und von vielen bereits als winzige Roboter bezeichnet werden.

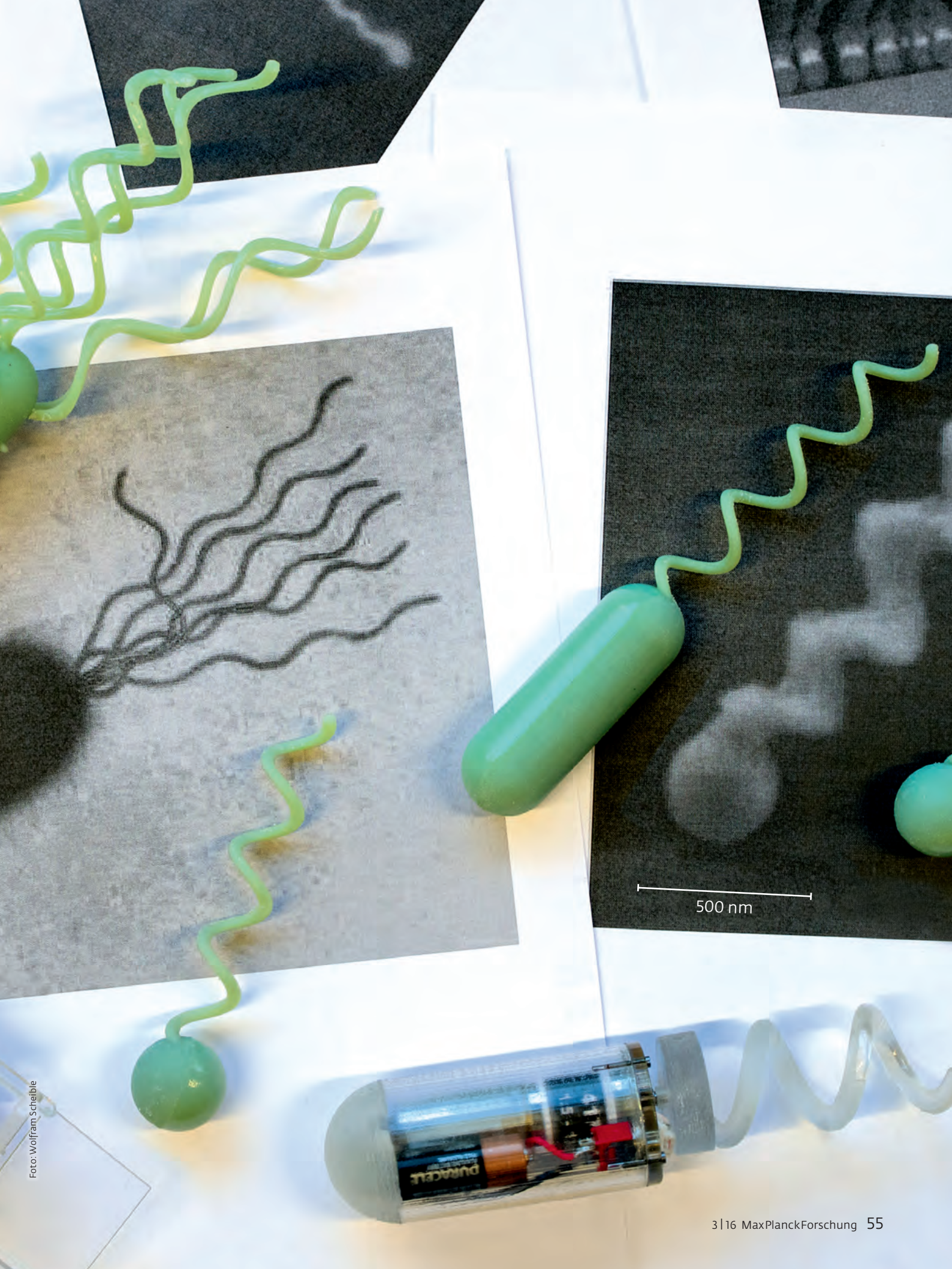
KEIN LIMIT, MASCHINEN BELIEBIG KLEIN ZU MACHEN

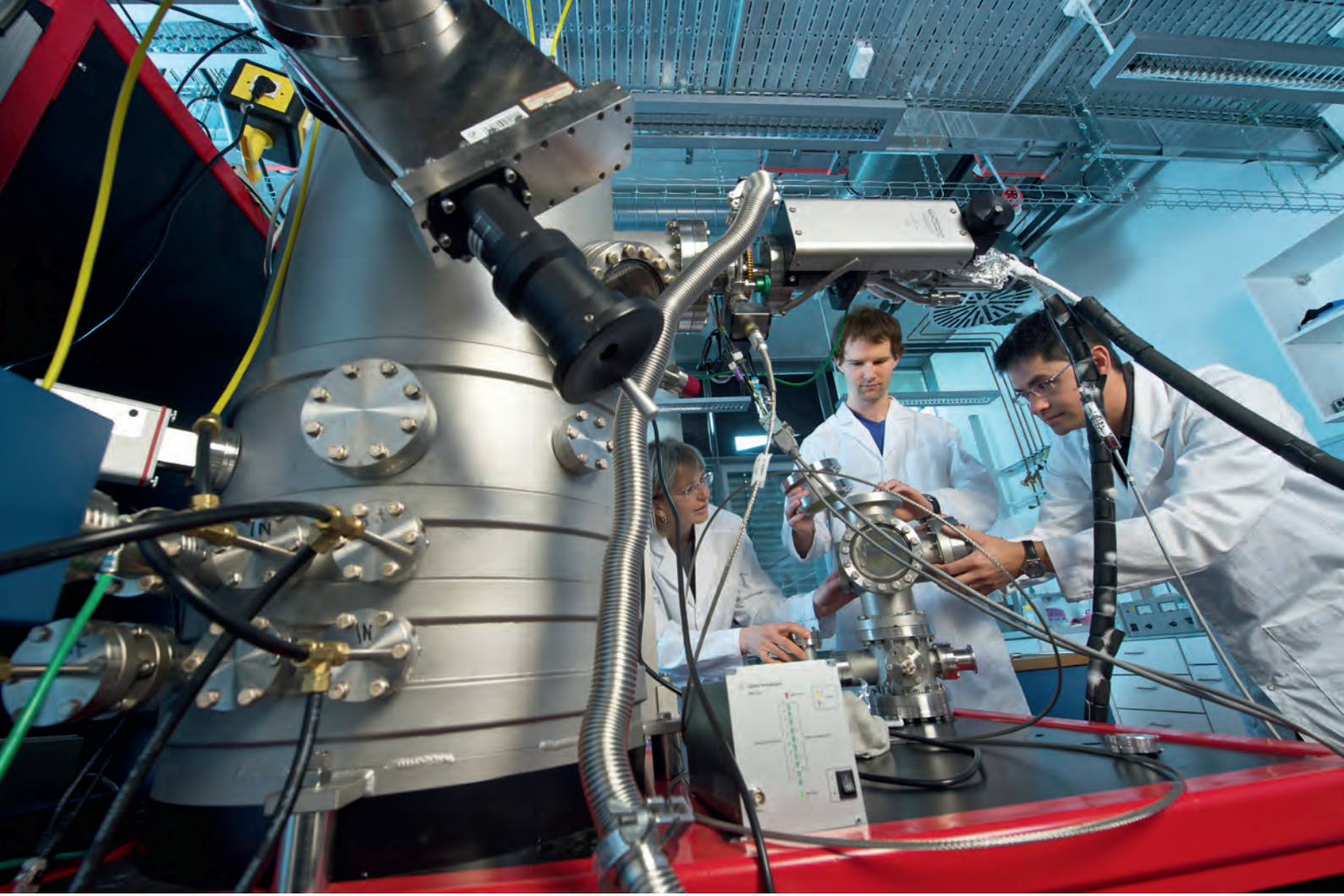
Wenn Fischer die Arbeit seines rund 20-köpfigen Teams und der externen akademischen Partner beschreibt, greift er gern auf eine fast 60 Jahre alte Vision von Richard P. Feynman zurück. Am 29. Dezember 1959 hielt der US-amerikanische Physiker einen Vortrag mit dem Titel: *There's Plenty of Room at the Bottom* – Es gibt viel Spielraum nach unten. Feynman meinte damit, dass es eigentlich kein Limit gebe, um Motoren, Maschinen und andere Dinge beliebig klein zu konstruieren. Wenn man so will, gab er damit den Startschuss für die Nanotechnik, lange bevor es diesen Begriff überhaupt gab.

Und Feynman hatte sehr konkrete Vorstellungen: „Obwohl es zunächst nach einer recht verrückten Idee klingt,

Es geht nur ums Prinzip: Die Bewegungsapparate etwa von Bakterien lassen sich für künstliche Mikro- und Nanoschwimmer nicht eins zu eins kopieren. Das zeigen Stuttgarter Forscher mit Modellen, in denen sie Batterien, Motoren und Platinen unterbringen. Weil dafür in winzigen Robotern kein Platz ist, setzen sie biologische Antriebe wie bei einer magnetisch angetriebenen Nanoschraube (ganz rechts) anders um.







Eine Produktionsstätte für Nanoroboter: Die Max-Planck-Forscher Conny Miksch, John Gibbs und Andrew Mark (von links) überprüfen die Vakuumanlage, in der komplexe Nanostrukturen Schicht für Schicht auf einen Silicium-Wafer aufgedampft werden.

wäre es meiner Meinung nach für die Chirurgie interessant, wenn man den Chirurgen sozusagen schlucken könnte. Man setzt ihn in die Blutbahn, er geht ins Herz hinein, sieht sich dort um, erkennt, welche Herzklappe die fehlerhafte ist, nimmt ein kleines Messer und schneidet sie heraus.“ Dies inspirierte auch Filmemacher. 1966 schickte Hollywood in *Die phantastische Reise* ein winziges U-Boot mit einem miniaturisierten Notfallteam an Bord durch die Adern eines Menschen, um in dessen Gehirn ein Blutgerinnsel zu entfernen.

Auch die Miniaturvehikel von Peer Fischers Arbeitsgruppe sollen sich im besten Falle eines Tages durch Gewebe, Schleimhäute, die Blut-Hirn-Schranke oder den Glaskörper des Auges bewegen. Sie werden dann zwar kaum verkleinerte Chirurgen an Bord haben, dafür aber vielleicht pharmazeutische Wirkstoffmoleküle, genetische Baupläne oder fernsteuerbares Operationsbe-

steck. In einen Zusammenhang mit der *Phantastischen Reise* will Fischer seine Arbeit dennoch nur ungern gebracht sehen. Zu viel in dem Film sei wissenschaftlich „äußerst fragwürdig“. So etwa „die aktive und kontrollierte Bewegung“ des Mini-U-Boots durch die Blutbahn. Und auch über eine Spitzengeschwindigkeit von 15 Knoten, das entspricht 30 Kilometern pro Stunde, kann Fischer nur schmunzeln: Solch ein Tempo ist für ein miniaturisiertes Tauchfahrzeug ziemlich unrealistisch.

EINE LA-OLA-WELLE AUF DEM WIMPERNTIERCHEN

In Hollywood musste man sich eben wenig Gedanken um physikalische Details in der Mikrowelt machen. Zum Beispiel um den Umstand, dass kleine Teilchen eine hohe Reibung erfahren, während ihre „Trägheit relativ unbedeutend wird“, wie es schon Richard Feynman in seinem Vortrag formuliert

hat. Hohe Reibung bei wenig Trägheit – das heißt nichts anderes, als dass ein Vehikel ohne Antrieb sofort zum Stehen kommt. Ein menschlicher Schwimmer gleitet nach einem Schwimmzug dank seiner Trägheit noch eine Zeit lang weiter durch das Wasser. Ein Bakterium aber, dessen Antrieb aussetzt, bewege sich gerade noch einen zehntel Nanometer weiter, so Peer Fischer. Denn wenn ein Bakterium in Wasser schwimmt, ist das ungefähr so, als müssten wir uns durch Teer schieben.

Und doch haben Einzeller offenbar Techniken entwickelt, um sich in diversen Flüssigkeiten aktiv zu bewegen. Viele Bakterien haben eine rotierende Geißel, die sie vorantreibt. Ein Spermium wiederum führt mit dem Schwanz eine Art Peitschenschlag aus, mit dem es sich von der Umgebung gleichsam abstößt.

Eine weitere Technik beherrschen Wimperntierchen. Diese Einzeller sind von zahllosen Härchen übersät, die sie in einer ausgeklügelten Choreografie bewe-

» Im Moment geht es Fischers Gruppe vor allem darum, Antriebsprinzipien zu finden und zu testen.

gen. Zeitlich aufeinander abgestimmt, machen die Härchen Bewegungen, die denen unserer Arme beim Brustschwimmen ähneln. Alle Härchen zusammen vollführen etwas wie eine La-Ola-Welle, die über den Körper des Wimperntierchens läuft und diesen vorantreibt.

Ausgerechnet dieser komplizierte Mechanismus inspirierte Peer Fischer und seine Mitarbeiter zum Antrieb für einen Mikroschwimmer. Eine direkte künstliche Kopie, so viel war schnell klar, würde dabei nicht möglich sein. „Es gibt schließlich keine elektronische Steuerung und auch keine Batterie, die klein genug wäre, um Gebilde in der Größe einzelner Härchen anzutreiben“, erklärt Fischer. „Was wir daher tun, ist: Wir versuchen die Essenz des Prinzips zu verstehen, zu vereinfachen und dann mit den uns möglichen Mitteln anzuwenden.“

In den Stuttgarter Labors wurde so aus der biologischen Vorlage, dem behaarten Einzeller, ein etwa einen Millimeter langer Zylinder aus einem besonderen Material – einem sogenannten Flüssigkristall-Elastomer: einem Kunststoff, der sowohl Merkmale einer Flüssigkeit als auch eines Kristalls aufweist. „Dabei handelt es sich um eine Art molekularen Muskel, in dem sich einzelne Abschnitte ausdehnen, sobald sie mit Licht einer bestimmten Wellenlänge bestrahlt werden“, erklärt Fischer.

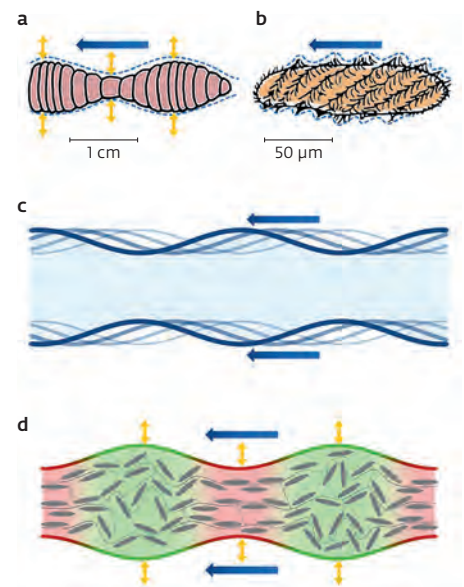
Konkret heißt das: Wo die Stuttgarter Forscher grünes Licht auf die Oberfläche strahlen, weitet sich der Zylinder. Verschwindet das Licht, so ziehen sich diese Bereiche wieder zusammen. Mithilfe eines komplexen Spiegelsystems führen die Stuttgarter Forscher daher in ihren Versuchen ein Gitter hauchdünner grüner Lichtstreifen über den winzigen Zylinder. Mit den Lichtstreifen

wandern wulstige Ringe über das Gefährt. Ähnlich wie bei der Peristaltik eines Regenwurms. Und so, wie dieser dabei die Erde hinter sich schiebt, drückt der pulsierende Zylinder die umgebende Wasser-Glycerin-Mischung an sich vorbei und bewegt sich darin fort. Tempo: rund ein Zentimeter pro Stunde.

Da ist das natürliche Wimperntierchen zwar noch um ein Vielfaches schneller. Das liege aber auch daran, dass es pro Sekunde einfach sehr viel mehr Wellen über seine Oberfläche schickt. Auf jeden Fall ist es den Forschern gelungen, das Fortbewegungsprinzip auf ihren Mikroschwimmer zu übertragen. Mehr noch: Dank ihres Spezialspiegels können sie das Lichtprofil beliebig variieren und damit auch die Bewegungsrichtung ihres zylindrischen U-Boot-Körpers ändern. So ließen sie ihn unter anderem die Umrisse eines Quadrats abschwimmen.

EINE MIKROMUSCHEL KÄME IM WASSER NICHT VOM FLECK

„Das war das erste Mal überhaupt, dass ein künstlicher Mikroschwimmer in der Lage war, Körperverformungen für seinen Antrieb zu nutzen, ohne dass von außen mechanische oder magnetische Kräfte einwirken mussten“, sagt Peer Fischer. Der winzige Schwimmbotter musste nur mit Licht bestrahlt werden. „Um solche Konstrukte aus lichtaktiven Flüssigkristall-Elastomeren auch in einem Organismus einzusetzen, werden sie vielleicht eines Tages einmal an die Enden von Glasfasern gesetzt“, erzählt Fischer. Dann vielleicht weniger als künstliche Mikroschwimmer, sondern als künstliche Muskeln, die am Ende eines Endoskops zum Beispiel weiche Roboterarme be-

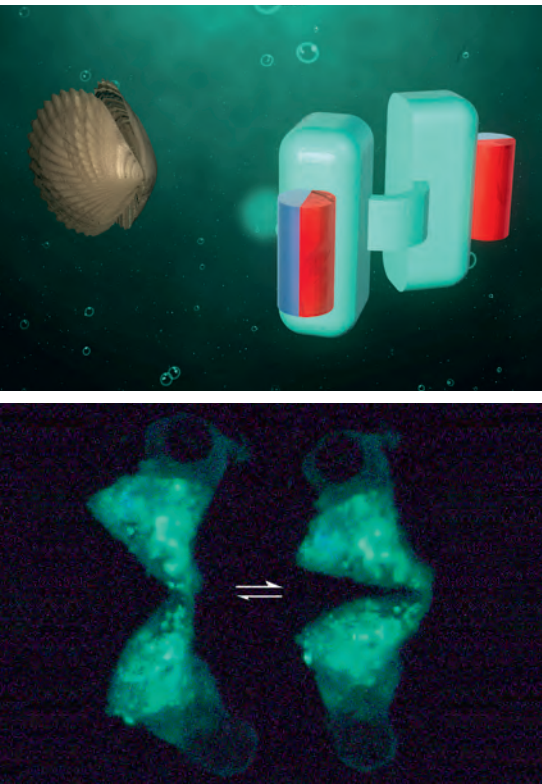


Die Natur als Vorlage: Durch die Peristaltik erzeugt ein Regenwurm (a) ebenso wie ein Wimperntierchen (b), das Härchen auf seiner Oberfläche koordiniert bewegt, eine Welle auf seiner Oberfläche (c). Dieses Prinzip setzen die Stuttgarter Forscher um, indem sie grüne Lichtstreifen über einen Kunststoffzylinder laufen lassen, der sich an den beleuchteten Stellen ausdehnt (d).

wegen könnten. Noch liegt das in weiter Ferne. Im Moment geht es Fischers Gruppe vor allem darum, Antriebsprinzipien zu finden und zu testen.

An einer Antriebsform arbeiteten die Forscher sogar, obwohl viele sie eigentlich für unmöglich hielten: jene der Jakobsmuschel. Diese schwimmt durchs Wasser, indem sie ihre beiden Schalenhälften gleichförmig auf- und zuklappt. Nun sind Jakobsmuscheln einige Zentimeter groß, und in dieser Dimension funktioniert das tadellos. Je kleiner eine solche Muschel aber würde,

» Antriebstechniken für kleinste künstliche Schwimmer zu finden ist eine Herausforderung für die Stuttgarter Forscher. Eine andere ist es, die Mikroschwimmer auf möglichst einfache Art herzustellen.



Nach dem Vorbild der Jakobsmuschel: Das Team um Peer Fischer hat einen Mikroschwimmer konstruiert, dessen beide Hälften durch ein Gelenk miteinander verbunden und mit Magneten versehen sind (oben). Indem die Forscher die beiden Hälften in einem Magnetfeld auf- und zuklappen (unten), bewegen sie die Mikromuschel durch biologische Flüssigkeiten.

desto mehr fiele die Reibung ins Gewicht. Das Wasser käme ihr immer zäher vor. Das gleichförmige Öffnen und Schließen der Schalen höbe sich dann unter dem Strich einfach auf – und eine Mikromuschel käme im Wasser überhaupt nicht vom Fleck. Diesen Zusammenhang formulierte Edward Purcell in einer Regel, die – nach dem englischen Namen für die Jakobsmuschel – Scallop-Theorem heißt.

ANDERS ALS WASSER: BIOLOGISCHE FLÜSSIGKEITEN

Diese Regel gilt nicht nur für das Auf- und Zuklappen zweier Muschelschalen, sondern ganz allgemein für spiegelsymmetrische Bewegungen in extrem zäher Umgebung. Im Mikrokosmos der Natur finden sich daher ausschließlich asymmetrische Antriebstechniken – die rotierende Bakteriengeißel etwa oder die Bewegungen der Härchen auf einem Wimperntierchen.

Trotzdem hatte sich Fischers Gruppe vorgenommen, Mikroschwimmer durch eine spiegelsymmetrische Motorik anzutreiben, weil die entsprechenden Bewegungsapparate meist auf einfacheren Mechanismen beruhen und sich mit weniger Aufwand herstellen lassen. Eine Chance für einen symmetrisch arbeitenden Antrieb sahen die Forscher, weil sich manche biologischen Flüssigkeiten anders verhalten als etwa Wasser. „In Gelenkflüssigkeit zum Beispiel oder im Glaskörper des Auges ordnen sich Moleküle der Hyaluronsäure zu netzwerkartigen Strukturen an, und genau das sorgt dafür, dass sich die Viskosität verändern kann“, erklärt Peer Fischer. Sobald sich ein Mikroschwimmer in diesen gelartigen Strukturen bewegt, nimmt die Viskosität ab, weil er

das Netzwerk aufricht. Verharrt er dagegen, werden die Bindungen zwischen den Molekülen sofort wieder geknüpft. Das Scallop-Theorem lässt sich in solchen Flüssigkeiten daher unterlaufen.

Das demonstrierte Fischers Team erstmals 2014: Die Forscher konstruierten einen etwa 0,3 Millimeter großen muschelartigen Körper, in dem die zwei Schalen über ein Gelenk miteinander verbunden sind. An die Schalen heften sie Mikromagnete. Setzten die Wissenschaftler die Mikromuschel nun einem äußeren Magnetfeld aus, klappten die Schalen zu. Schalteten sie das Magnetfeld wieder ab, so öffnete eine Art Rückstellmechanismus im Gelenk die künstliche Muschel wieder.

„Entscheidend ist, dass wir die Schalen sehr viel schneller öffnen, als wir sie schließen“, erklärt Fischer. „Dieser zeitlich asymmetrische Bewegungszyklus führt dazu, dass die umgebende Flüssigkeit beim Öffnen dünnflüssiger ist als während des langsamen Schließvorgangs.“ Daher legt die Muschel beim Öffnen der Schale eine größere Strecke zurück als beim Schließen. Unter dem Strich kommt sie also voran – aber nur in Flüssigkeiten, die sich wie etwa Gelenkflüssigkeit verhalten.

Antriebsprinzipien zu finden, die kleinste künstliche Schwimmer nach vorne bringen, ist die eine Herausforderung für die Stuttgarter Forscher. Eine andere ist es, Mikroschwimmer wie die winzige magnetgetriebene Muschel auf möglichst einfache Art herzustellen. Deren Schalen sollten einerseits möglichst dünn sein, müssen andererseits aber auch robust genug sein, um das ständige Auf- und Zuklappen in einer vergleichsweise zähen Umgebung auszuhalten. Als Material wählten die Forscher für die Mikromuschel schließlich



Staub stört: Im Reinraumlabor stellen die Forscher mithilfe der Fotolithografie Mikrostrukturen wie etwa eine Mikromuschel her. Dabei müssen sie selbst kleinste Verunreinigungen aus der Luft vermeiden.

ein solides Siloxan-Polymer, aus dem ein 3D-Drucker die winzige Struktur aufbaute, einschließlich des Gelenks, das gerade einmal 60 Mikrometer dünn war. Das entspricht in etwa dem Durchmesser eines menschlichen Haars.

Auch wenn es schon viel Präzision erforderte, die filigrane Muschelkopie herzustellen, ungleich schwieriger war es, das bisher kleinste Vehikel der Stuttgarter Flotte zu fertigen. Dabei handelt es sich um ein 400 Nanometer langes Schraubchen aus Quarzglas und etwas Nickel. Der korkenzieherartig gewundene Strang ist gerade einmal 70 Nanometer dick – und damit fast 1000 Mal dünner als ein menschliches Haar. Die diffizile Produktion gelang den Forschern schließlich nur dank eines Verfahrens, das sie selbst entwickelt hatten (siehe Kasten rechts).

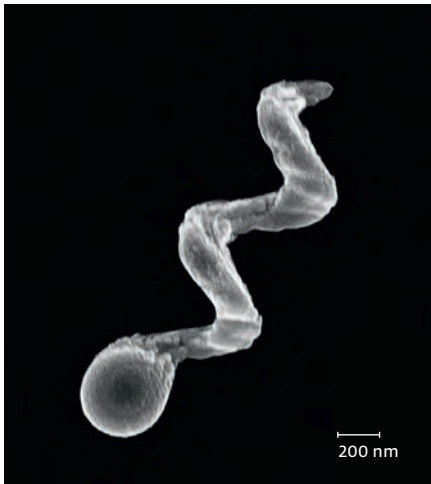
Dass die Stuttgarter Forscher überhaupt an Vehikeln tüfteln, die kleiner als jedes Bakterium sind, hat einen einfachen Grund: Sie suchen ein Schwimmgerät, das klein genug ist, um durch das

NANOBAUTEILE NACH MASS

Es ist nicht gerade trivial, im Bereich von Nanometern hochpräzise Bauteile wie eine korkenzieherähnliche Nanoschraube zu fertigen. Die Stuttgarter Max-Planck-Forscher bauen solche Nanostrukturen Schicht für Schicht auf: Zunächst überziehen sie einen Silicium-Wafer mit einem dichten Raster von nur acht Nanometer großen Goldpunkten. Den Wafer positionieren sie in einer Vakuumkammer, in der sie die gewünschten Materialien verdampfen. Die Substanzen fliegen nun zu dem Wafer, den die Forscher so positionieren, dass die Teilchen nicht die Wafer-Oberfläche, sondern nur die Golderhebungen treffen können und sich dort abscheiden. (Ganz so wie eine schräg stehende Abendsonne in den Bergen nur noch die Bergrücken und -gipfel anstrahlt, nicht aber die Talsohlen.) Auf diese Weise wachsen feine, sauber voneinander getrennte Strukturen.

Indem die Forscher den Wafer während des Abscheidenvorgangs in verschiedene Richtungen drehen – sie müssen nur darauf achten, dass die verdampften Substanzen nicht auf die Wafer-Oberfläche gelangen –, können sie auch komplexe Geometrien erzeugen. So entsteht die korkenzieherähnliche Nanoschraube, indem sie den Wafer kontinuierlich drehen. Wenn sie den Wafer abrupt kippen, knickt die aufgedampfte Struktur ab, sodass Zickzackformen möglich werden. Da die Strukturen Atomlage für Atomlage wachsen, können die Stuttgarter Forscher den Prozess jederzeit unterbrechen und mit einem anderen Material fortsetzen. Auf diese Weise gelingt es ihnen beispielsweise, magnetisches Nickel in eine Nanostruktur einzubauen, die ansonsten aus Siliciumdioxid oder Titandioxid besteht.

» Zum ersten Mal ist es gelungen, einen Mikroschwimmer durch ein zähes biologisches Medium zu manövrieren.



Ein Öffner für die Magenschleimhaut: Die korkenzieherförmige Mikroschraube aus Quarzglas beschichten die Stuttgarter Forscher mit Enzymen, mit deren Hilfe die Schleimhaut lokal verflüssigt wird. So kann das Vehikel durch das gelartige Netzwerk schwimmen.

dreidimensionale Hyaluronsäure-Netzwerk zu schwimmen, ohne dass dieses aufgebrochen werden muss. „So ein Schwimmer muss natürlich kleiner sein als die molekulare Maschenweite dieser Netzwerke, und die liegt bei wenigen Hundert Nanometern“, so Fischer.

Für ihr schraubenförmiges Design bedienten sich die Forscher einmal mehr einer Vorlage aus der Natur, nämlich der Bakteriengeißel. Diese funktioniert so ähnlich wie ein Korkenzieher, nur dass sich die Mikroben damit durch Flüssigkeiten statt durch Kork bohren. Genau das kann auch die Stuttgarter Nanoschraube. Für die notwendige Rotation sorgt wiederum ein von außen angelegtes Magnetfeld, das auf das Nickel in der Schraube wirkt.

Ihren Nanoschwimmer setzten die Forscher in eine Modellflüssigkeit aus

Wasser und Hyaluronsäure, schalteten das Magnetfeld ein und – freuten sich. Im Mikroskop konnten sie verfolgen, wie souverän sich das Schraubchen seinen Weg bahnte. Dass dies wirklich an der Winzigkeit des Vehikels lag, bewies der Vergleich mit einer Schraube im Mikrometermaßstab. Diese saß schon nach wenigen Umdrehungen unverkennbar fest.

EIN U-BOOT MIT EINGEBAUTEM SCHLEIMLÖSER

Durch die Maschen zu schlüpfen, ist eine Möglichkeit, ein eng geknüpftes Molekülnetzwerk zu durchdringen. Die Stuttgarter hatten aber noch eine weitere Idee, wie das gelingen könnte. Ist es möglich, die gelartige Struktur einfach chemisch aufzulösen, sie also quasi zu verflüssigen? Das könnte zum Beispiel interessant sein, um mit einem schwimmenden Vehikel Medikamente durch die Schleimhaut des Magens, des Darms oder der Lunge direkt zu Krankheitsherden zu transportieren.

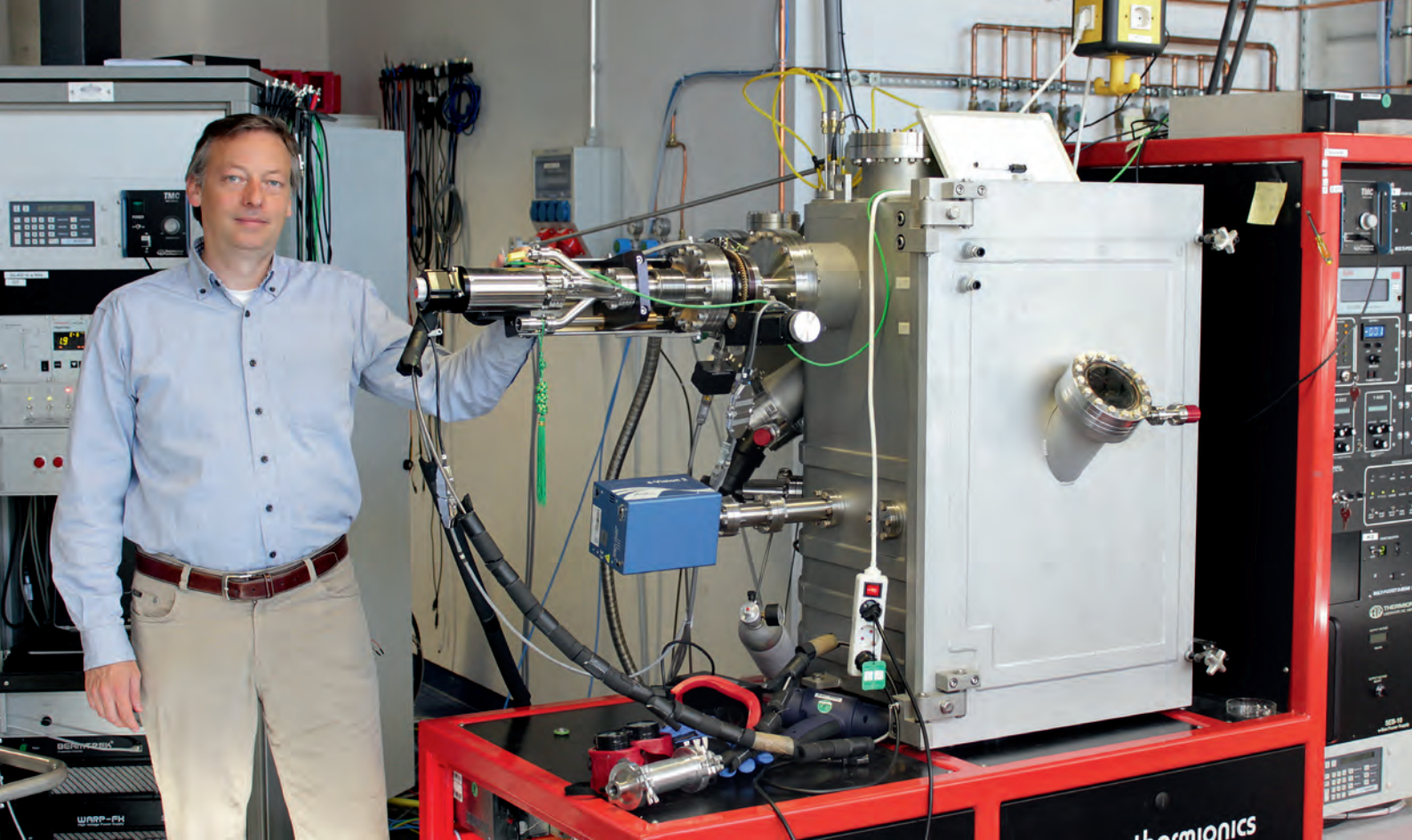
Um ein winziges U-Boot mit eingebautem Schleimlöser zu entwerfen, half den Forschern einmal mehr ein Blick in die Natur. Den entscheidenden Wink lieferte nämlich ein Bakterium namens *Helicobacter pylori*. Wer davon schon einmal gehört hat, verbindet damit sicher nichts Gutes. Denn seit etwa 25 Jahren ist bekannt, dass *H. pylori* in der menschlichen Magenwand Entzündungen und Geschwüre hervorrufen kann. Es gelingt ihm also, sich einen Weg durch die Magenschleimhaut zu bahnen, und zwar indem es ein Enzym namens Urease absondert. Dieses zerlegt den in der Magenflüssigkeit vorkommenden Harnstoff. Dabei wird Ammoniak freigesetzt – eine basische Substanz, die den pH-Wert im ansonsten

sauren Milieu des Magens lokal in die Höhe treibt. Dabei bricht das gelartige Netzwerk der Moleküle in der Magenschleimhaut auf, und die Bakterien können hindurchschwimmen.

Diesen Effekt ahmte Fischers Team nach und konstruierte dafür eine Glaschraube – ähnlich der schon erwähnten Nanoschraube, nur größer. Das Gewinde beschichteten die Forscher mit Urease. Auch dieser Schwimmer enthielt etwas Nickel, um ihn per Magnetfeld rotieren lassen zu können. Diesen enzymbeschichteten Mikroroboter testete das Team schließlich in einem Milieu aus Schweinemagenschleimhaut – und konnte ihn in der Tat hindurchfahren. Auch dies eine Premiere: „Zum ersten Mal ist es damit gelungen, einen Mikroschwimmer durch ein zähes biologisches Medium zu manövrieren“, sagt Peer Fischer sichtlich erfreut.

Das Beispiel der Urease zeigt, dass auch der Griff in die chemische Trickkiste Möglichkeiten für die Bewegung von Mikroschwimmern eröffnet. Davon wollen die Stuttgarter in Zukunft noch häufiger Gebrauch machen. So möchten sie Minivehikel entwickeln, die ihren Vortrieb autonom erzeugen. Bei allen bisherigen Projekten mussten die Forscher noch von außen einwirken, um die U-Boote in Bewegung zu versetzen, sei es mit Magnetfeldern oder mit Licht. „Wenn wir unsere Nanoroboter mit einem chemischen Brennstoff ausrüsten könnten, dann hätten sie den Motor sozusagen mit an Bord“, sagt Peer Fischer.

Einen ersten Ansatz gibt es dafür bereits. Und zwar in Form einer Mikrokugel, die zwei Gesichter trägt. Auf der einen Hälfte ist die Oberfläche mit einem Katalysator bestückt, auf der anderen nicht. In einer Flüssigkeit mit einer Substanz, bei welcher der Katalysator



Am Steuer der Nanoproduktion: Indem die Forscher einen Silicium-Wafer in der Vakuumanlage kippen und drehen, wenn sie Material aufdampfen, erzeugen sie Nanostrukturen in Form von Schrauben oder Zickzacklinien. Peer Fischer hält den Manipulator, mit dem sich der Wafer justieren lässt.

eine chemische Reaktion auslöst, treibt dieser janusköpfige Partikel sich selbst an. Denn in der Umgebung der Kugelhälfte mit dem Katalysator verändert die chemische Reaktion die Konzentrationen der daran beteiligten Substanzen. Im Vergleich zur Umgebung der anderen Kugelhälfte ergibt sich also ein Konzentrationsunterschied.

„Wie bei der Osmose will das System diesen Konzentrationsunterschied ausgleichen“, erläutert Peer Fischer. Das heißt, die Substanzen bewegen sich an der Mikrokugel entlang, erzeugen dabei eine Kraft und schieben das Kügelchen parallel zum Konzentrationsgefälle vorwärts. Fischer und seine Mitarbeiter würden dieses Prinzip nun gerne auf biologische Umgebungen übertragen und den bislang metallischen Katalysator durch geeignete Enzyme ersetzen. Am Ende könnte dann eine Art biologisches Chemotaxi mit eigenem Antrieb stehen. Und wenn solch ein Gefährt künftig einmal in den Stuttgarter Labors unterwegs ist, wird das Reinigungspersonal mitunter wieder draußen bleiben müssen. Sicher ist sicher. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Mikro- und Nanoroboter, die sich durch den Körper manövrieren lassen und Wirkstoffe zu Krankheitsherden bringen, könnten medizinische Therapien effizienter machen.
- Stuttgarter Max-Planck-Forscher entwerfen Antriebe für solche winzigen Vehikel und entwickeln Methoden, um sie herzustellen.
- Dabei ahmen sie Mechanismen aus der Natur nach – etwa die konzertierte Bewegung der Härchen eines Wimperntierchens oder die schleimlösende Wirkung von *Helicobacter pylori* – und setzen sie mit den technisch möglichen Mitteln um.

GLOSSAR

Flüssigkristall-Elastomer: Ein Kunststoff, der sich elastisch verformen lässt und dabei die Struktur eines Flüssigkristalls aufweist. Flüssigkristalle sind zwar flüssig, ihre Moleküle bilden jedoch keine ungeordnete Struktur wie Flüssigkeiten, sondern ordnen sich zumindest in einer Dimension mit einer bevorzugten Orientierung an, was sie Kristallen ähneln lässt.

pH-Wert: Ein Maß dafür, wie sauer oder basisch eine Flüssigkeit ist. In saurem Milieu ist der pH-Wert niedrig, in basischem hoch.

Scallop-Theorem: Dieser Regel zufolge lassen sich sehr kleine Schwimmkörper in den meisten Flüssigkeiten wie etwa in Wasser nicht durch symmetrische Bewegungen antreiben. Sie können sich also nicht wie zum Beispiel eine Jakobsmuschel (englisch *scallop*) fortbewegen. Denn bei Nano- und Mikroschwimmern ist der Effekt der Reibung viel größer als die Wirkung der Trägheit, sodass symmetrische Bewegungen den Schwimmer genauso weit vor- wie zurückbewegen. Allerdings lässt sich diese Regel in gelartigen biologischen Flüssigkeiten unterlaufen.