

## Wie Spermien zum Ei finden

# Eine schwimmende Sinneszelle

BENJAMIN FRIEDRICH | U. BENJAMIN KAUPP

*Wie findet ein Spermium das Ei? Beim Seeigel können die Spermien das Ei riechen. Dabei dient ihre lange Geißel als chemische Antenne und als Antrieb. Dahinter steckt vermutlich ein universelles Prinzip der Natur.*



**Viele Meerestiere, etwa Seeigel, geben Spermien und Eizellen direkt ins Wasser ab, wo die Befruchtung stattfindet. Bei vielen Arten lockt die Eizelle die Spermien mit artspezifischen Botenstoffen an. Die Spermien müssen diese chemische Fährte aufnehmen und den eigenen Schwimmpfad richtig steuern, also ein nichttriviales Steuerungsproblem lösen.** © Cornerstone@pixelio.de

Sex zwischen Seeigeln besteht darin, Spermien und Eizellen ins Meerwasser freizusetzen. Dort findet dann die Befruchtung statt. Allerdings ist der Ozean groß, Eizellen und Spermien werden schnell verdünnt. Wie also findet ein Spermium eine Eizelle – und dazu noch der gleichen Art? Die Antwort: Spermien riechen das Ei. Die Eizellen besitzen einen artspezifischen chemischen Botenstoff, der die Spermien anlockt. Die Spermien haben eine sehr feine „Nase“ und reagieren bereits auf einzelne Botenstoffmoleküle im Meerwasser. Das konnten Forscher um einen der beiden Autoren dieses Beitrags, Benjamin Kaupp, am Center of Advanced European Studies and Research in Bonn zeigen [1]. Einzelne Botenstoffmoleküle informieren das Spermium dar-

über, dass die Eizelle nicht mehr weit sein kann. Sie weisen aber noch keinen Weg, in welcher Richtung das Ei zu suchen ist. Um das Ziel zu erreichen, setzen Seeigelspermien ein ausgeklügeltes Zusammenspiel von Schwimmbewegung und Signaldetektion ein [2].

### Wie schwimmen Spermien?

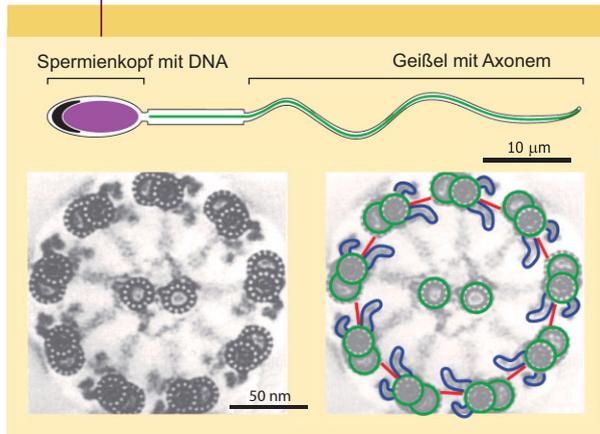
Spermien werden durch regelmäßige Wellenbewegungen ihrer Geißel angetrieben [3,4]. Die Geißel ist ein zwanzigstel Millimeter lang. Sie kann bis zu 50-mal pro Sekunde wie eine Peitsche schlagen. Spermien erreichen damit Geschwindigkeiten von etwa einem Zentimeter pro Minute, das entspricht vier Körperlängen pro Sekunde. Die Geißel besteht aus einem zylindrischen Zytoskelett, dem Axonem. Dieses besitzt einen erstaunlich regelmäßigen Aufbau mit neun kreisförmig angeordneten Fasern, den Mikrotubuli (Abbildung 1). Das Axonem ist ein wahrer „Bestseller“ der Natur: Es dient zum Beispiel einzelligen Grünalgen zur Fortbewegung, findet sich aber auch bei den Riechzellen in der Nase und den Sehzellen auf der Netzhaut des Auges.

Zwischen den neun äußeren Mikrotubuli befinden sich zahlreiche molekulare Motoren. Diese Nanomaschinen, raffiniert konstruierte Eiweißmoleküle, wandeln chemische Energie in mechanische Kräfte um, die die Mikrotubuli (lokal) gegeneinander verschieben können. Die Mikrotubuli sind am Kopfende fest miteinander verbunden, deshalb verkrümmt die Aktivität der molekularen Motoren die Geißel. Eine dynamische Instabilität des Systems führt schließlich zu einem regelmäßigen Geißelschlag.

Wie die Wellenbewegung der Geißel das Spermium im Wasser antreibt, ist eine interessante hydrodynamische Fragestellung, da bei diesen kleinen Schwimmern Trägheitskräfte vernachlässigbar sind (siehe „Schwimmen bei kleinen Reynoldszahlen“ auf S. 199). Wesentlich für das Folgende ist, dass Spermien nicht einfach geradeaus schwimmen, sondern auf gekrümmten Bahnen entlang von Kreisen und Helices, also Spiralbahnen. Ursache für die gekrümmten Schwimmbahnen ist eine Asymmetrie des Geißelschlags [4, 5]. Wieso die Geißel asymmetrisch schlägt, ist unzureichend erforscht.

### Signalverarbeitung im Spermium

Die Spermiengeißel dient nicht nur als Antrieb, sondern zugleich als chemische Antenne. Entlang der gesamten Geißel befinden sich dicht gepackt Rezeptoren für Botenstoffe der Eizelle. Auch in den Riechsinneszellen unserer Nase arbei-

**ABB. 1 | SPERMIENGEISSEL**


**Die Spermiengeißel birgt in ihrem Inneren eine zylindrische Zellskelettstruktur, das Axonem. Die elektronenmikroskopische Aufnahme zeigt deren Querschnitt. Zwischen den äußeren Zellskelettfasern (Mikrotubuli, grün) befinden sich jeweils molekulare Motoren (blau). Zehntausende dieser Nanomaschinen erzeugen zusammen eine regelmäßige Wellenbewegung der Geißel (Grafiken aus [12]).**

ten Tausende chemische Antennen, um Duftstoffe aus der Luft zu registrieren [6]. Die Geißel muss jedoch das chemische Signal von der Eizelle nicht nur registrieren, sondern auch verarbeiten und dann die Schwimmbahn des Spermiums entsprechend steuern.

Zur Verarbeitung des chemischen Signals der Eizelle bedienen sich die Spermien eines ähnlichen Prinzips wie Nervenzellen. Sowohl Neuronen als auch Spermien verwenden elektrische Spannungsunterschiede zur Informationsverarbeitung. Wie in allen Zellen sorgen molekulare Pumpen in der Zellmembran des Spermiums aktiv für einen Konzentrationsunterschied von lebenswichtigen Ionen wie Calcium, Natrium und Kalium zwischen Zellinnerem und -äußeren. Da die Zellmembran wie ein Kondensator wirkt, führt ein Konzentrationsunterschied der geladenen Ionen zu einer elektrischen Potentialdifferenz zwischen Zellinnerem und -äußeren – der sogenannten Membranspannung. Sobald die Rezeptoren auf der Geißeloberfläche den Botenstoff registrieren, öffnen sich mikroskopisch kleine Ionenkanäle in der Zellmembran, die nur für eine bestimmte Ionenart, in diesem Fall Kalium, durchlässig sind. Dadurch strömt Kalium aus der Spermienzelle; die Membranspannung wird negativer und aktiviert wiederum andere Ionenkanäle, die für Calciumionen durchlässig sind. Das einströmende Calcium reguliert die Aktivität der molekularen Motoren im Axonem und damit den Geißelschlag des Spermiums.

Dieses Signalsystem ähnelt besonders dem einer ganz speziellen Klasse von Nervenzellen, den lichtempfindlichen Sehzellen. Interessanterweise sind auch die Sehzellen äußerst sensitiv: Während Seeigel-Spermien auf einzelne Botenstoffmoleküle reagieren, können Sehzellen einzelne Photonen registrieren.

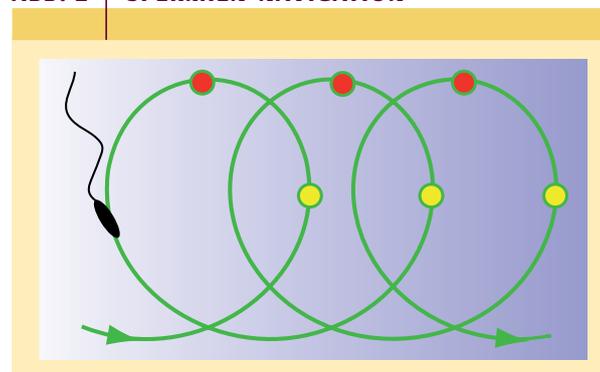
Das Signalsystem erlaubt den Spermien, auf elektrochemischem Wege elementare Rechenoperationen auszu-

führen. Spermien können beispielsweise die Zeitableitung eines Eingangssignals berechnen [5]. Dieses Eingangssignal ist in unserem Fall die Konzentration des Botenstoffs, das heißt, Spermien reagieren auf die zeitliche Änderung der Konzentration unabhängig von ihrem Absolutwert. Die Signalkaskade wurde mit raffinierten experimentellen Methoden aufgeklärt, die eine optische Messung von Membranspannung und Calciumkonzentration erlauben [7]. Allerdings sind viele grundlegende Fragen noch ungeklärt, zum Beispiel wie die Regulation der Motoraktivität genau funktioniert.

### Spiralbahnen als Navigationsprinzip

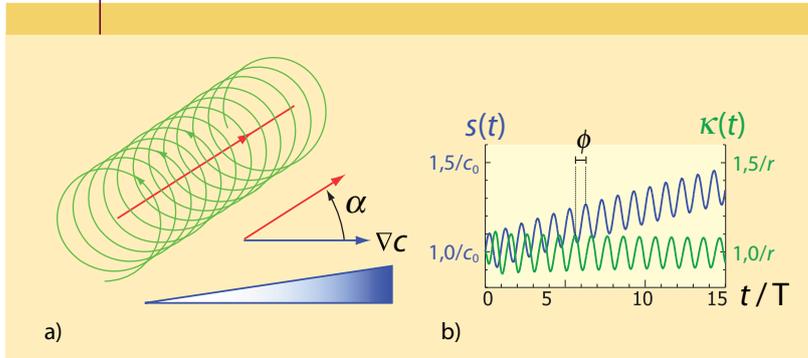
Am Caesar-Institut in Bonn beobachten wir die Schwimmbahnen von Seeigelspermien in einer flachen Kammer unter dem Mikroskop. Solange noch kein Botenstoff zugefügt wurde, schwimmen die Spermien auf einer gekrümmten Bahn im Kreis. Die Schwimmkreise haben einen Durchmesser von etwa einem Zwanzigstel Millimeter; für einen Umlauf benötigen die Spermien eine Sekunde. Wenn man in der Kammer ein Konzentrationsgefälle des Botenstoffs aufbaut, steuern die Spermien dieses Gefälle hinauf. Ihre Schwimmbahn ähnelt dabei einem driftenden Kreis (Abbildung 2).

Um dieses Verhalten zu verstehen, haben wir am Dresdner Max-Planck-Institut für die Physik komplexer Systeme ein mathematisches Modell entwickelt [2]. Diese Arbeit führte der Erstautor dieses Beitrags, Benjamin Friedrich, im Team von Frank Jülicher durch. Eine wichtige Größe des Modells ist die Botenstoffkonzentration an der Position des Spermiums. Experimente weisen darauf hin, dass das Spermium die Konzentrationsmessung über alle Rezeptoren mittelt, folglich müssen wir nur diesen gemittelten Wert der Konzentration berücksichtigen. Eine zweite wichtige Größe in dem Modell ist die Krümmung der Schwimmbahn. Bei

**ABB. 2 | SPERMIEN-NAVIGATION**


**Eine flache Beobachtungskammer zwingt Seeigelspermien in kreisförmige Bahnen. In einem Konzentrationsgefälle des Botenstoffes (blau) ähnelt diese einem driftenden Kreis (grün). Entlang dieser Bahn nimmt das Spermium eine zeitlich veränderliche Konzentration des Botenstoffes wahr. Die Konzentrationsmaxima liegen an den gelben Punkten. Die Krümmung der Schwimmbahn ändert sich ebenfalls zeitlich und hat Maxima an den roten Punkten.**

ABB. 3 | KREISBAHNEN



Unser Modell liefert für ein Spermium in einem linearen Konzentrationsgradienten des Botenstoffes eine Schwimmbahn in Form eines driftenden Schwimmkreises. Die Driftrichtung der Schwimmkreise (Winkel  $\alpha$ ) hängt ab von der Phasenverschiebung  $\phi$  zwischen einem periodischen Konzentrationssignal  $s(t)$  (blaue Kurve in b), welches das Spermium entlang seiner Schwimmbahn wahrnimmt, und einer Modulation der Krümmung seiner Schwimmbahn (grün in b;  $T$  ist Periode eines Kreises beim Schwimmen). Damit wird sie von den Zeitskalen der Signalverarbeitung im Spermium bestimmt.

einer geraden Schwimmbahn ist diese null. Ein Kreis mit Radius  $r$  besitzt eine konstante Krümmung  $1/r$ . Bei komplexeren Bahnen ist die Krümmung an jedem Punkt eine andere. Definiert wird sie als das Inverse des Radius eines Kreises, der sich an diesem Punkt perfekt an die Kurve anschmiegt.

Während die Spermien auf Kreisbahnen durch das Konzentrationsgefälle schwimmen, nehmen sie zu verschiedenen Zeiten jeweils verschiedene Konzentrationen wahr. Dieses Signal nimmt periodisch zu und ab, an den gelben Positionen ist es maximal (Abbildung 2). Wenn die Spermien nun genau einen Viertelumlauf später die Krümmung ihrer Schwimmbahn erhöhen - Signalverarbeitung braucht schließlich Zeit - driftet ihr Schwimmkreis das Konzentrationsgefälle hinauf. Unser Modell sagt voraus, dass die Driftrichtung der Schwimmkreise entscheidend von der Reaktionszeit der Signalverarbeitung abhängt. Optimal ist eine Verzögerung von einem Viertel Umlauf. Um zu höheren Botenstoffkonzentration zu driften, reicht es aus, wenn die Reaktionszeit in einem gewissen Bereich um den optimalen Wert liegt. Dieser Spielraum ist wichtig, da die Signalverarbeitung in einem biologischen System vielen Störfaktoren unterliegt und nicht feinjustiert ist. Ansonsten würde eine „falsche“ Reaktionszeit, zum Beispiel von einem  $3/4$  Umlauf, dazu führen, dass die Spermien den Botenstoff meiden anstatt davon angezogen zu werden. Die optimale Reaktionszeit hat sich im Lauf der Evolution durchgesetzt.

### Ein einfaches Modell

Die Spermien-Navigation in einer flachen Beobachtungskammer können wir mit einem einfachen Modell beschreiben [2, 8]. Schwimmt ein Spermium in der  $xy$ -Ebene mit Geschwindigkeit  $v_0$  in einem Winkel  $\psi$  zur  $x$ -Achse, so ändern sich seine  $x$ - und  $y$ -Koordinaten als Funktion der Zeit  $t$  gemäß der einfachen Differentialgleichung

$$\frac{dx}{dt} = v_0 \cos \psi,$$

$$\frac{dy}{dt} = v_0 \sin \psi.$$

Schwimmt das Spermium auf einer gekrümmten Bahn mit der Krümmung  $\kappa$ , so ändert sich die Schwimmrichtung fortwährend:

$$\frac{d\psi}{dt} = v_0 \kappa.$$

Für  $\kappa = 0$  schwimmt das Spermium geradeaus; ist die Krümmung von Null verschieden und zeitlich konstant,  $\kappa(t) = \kappa_0$ , so schwimmt das Spermium auf einer perfekten Kreisbahn mit Radius  $r_0 = 1/\kappa_0$ .

Wir betrachten nun ein Modellspermium, das die Krümmung seiner Schwimmbahn fortlaufend an die lokale Konzentration des Botenstoffes anpasst. In einem Konzentrationsgradienten ist die Botenstoffkonzentration eine Funktion des Ortes  $c = c(x, y)$ . Während das Spermium in diesem Konzentrationsfeld schwimmt (Abbildung 3a), nimmt es ein zeitlich veränderliches Konzentrationssignal wahr:

$$s(t) = c(x(t), y(t)).$$

$s(t)$  dient als Eingangssignal für ein komplexes elektrochemisches Signalverarbeitungsmodul, das ähnlich wie eine Nervenzelle arbeitet. Für unsere Zwecke kommt es aber nur darauf an, dass dieses Modul adaptiert und auf zeitliche Änderungen des Konzentrationssignals reagiert. Wir können diese Eigenschaft also stark vereinfacht beschreiben. Dazu drücken wir die Krümmung der Schwimmbahn durch die Zeitableitung des Konzentrationssignals aus ( $\kappa_0$  und  $\kappa_1$  sind Konstanten):

$$\kappa = \kappa_0 - \kappa_1 \frac{(ds/dt)}{s}.$$

In einem homogenen Konzentrationsfeld gilt  $ds/dt = 0$ , und das Spermium schwimmt im Kreis. In einem linearen Konzentrationsgradienten  $c(x, y) = c_0 + c_1 x$  oszilliert der Konzentrationsstimulus in erster Näherung mit der Frequenz  $\omega_0 = v_0 \kappa_0$  des Kreisschwimmens (Abbildung 3 b, blaue Kurve):

$$s(t) - c_0 \propto c_1 r_0 \cos(\omega_0 t).$$

Die Signalverarbeitung im Spermium induziert eine ebensolche Oszillation der Krümmung  $\kappa(t)$  um ihren Ruhewert  $\kappa_0$ . Allerdings hat sie eine Phasenverschiebung, die in unserem Modell  $\phi = 90^\circ$  beträgt (Abbildung 3 b, grüne Kurve):

$$\kappa(t) - \kappa_0 \propto \sin(\omega_0 t) = \cos(\omega_0 t - \phi).$$

Allgemein hängt die Phasenverschiebung  $\phi$  von den Zeitkonstanten der Signalverarbeitung ab.

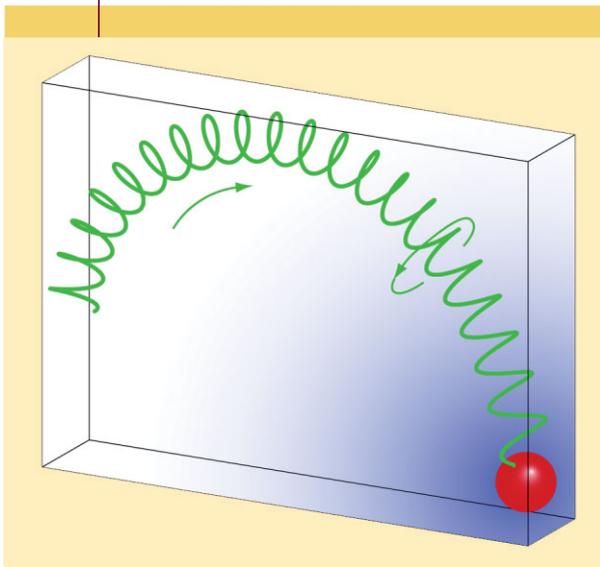
Eine Näherungslösung der Differentialgleichungen für die Schwimmbahn ergibt, dass die Spermieschwimmkreise in einem Winkel  $\alpha = 270^\circ + \phi$  zum Konzentrationsgradienten driften.

### Dreidimensional im Meer

Das Modell erklärt die Schwimmbahn von Spermien in einer flachen Kammer, wie sie von den Bonnern und anderen Wissenschaftlern beobachtet wurden. Im Meer allerdings schränken keine Wände die Bewegungsfreiheit der Seeigelspermien ein. Deshalb schwimmen diese nicht auf Kreisbahnen, sondern entlang von Schraubenlinien – vergleichbar den Windungen eines Telefonkabels. Das Modell kann auch die Navigation entlang gewundener Bahnen beschreiben [2, 9]. Es zeigt, wie die Spermien zuverlässig ein Ziel finden, das den passenden Botenstoff freisetzt. Schwimmt ein Spermium in einem Konzentrationsgefälle dieses Botenstoffs, so biegt sich seine Schraubenlinie, bis die Mittelachse genau in Richtung des Konzentrationsgefälles zeigt (Abbildung 4). Danach schwimmen Spermien das Konzentrationsgefälle hinauf, hin zu Regionen mit höherer Konzentration – und damit hoffentlich zum Ei.

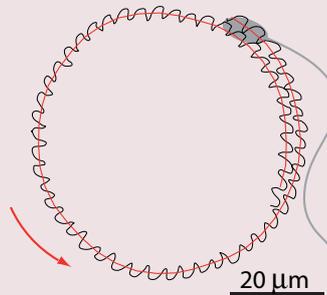
Die Schwimmbahn der Spermien in drei Raumdimensionen aufzuzeichnen ist experimentell schwierig. Die Navigation entlang von Schraubenlinien ist deshalb noch unzureichend erforscht. Unsere theoretische Arbeit schlägt eine Brücke von den gut verstandenen Kreisbahnen in flachen, quasi zweidimensionalen Beobachtungskammern, zu den spiralförmigen Bahnen im Meer. Auch wenn beide Bahnformen sehr verschieden sind, funktioniert die Navigationsstrategie in beiden Fällen sehr ähnlich.

ABB. 4 | SCHRAUBENBAHNEN



**Im freien Meer schwimmen Seeigelspermien entlang Schraubenlinien. In dieser Simulation sondert eine Eizelle (rot) einen chemischen Botenstoff (blau) ab und lockt so ein Spermium an (grüne Bahn). In der Nähe der Eizelle biegt sich die Schraubenlinie seiner Schwimmbahn so, dass sie zum Ei hin weist.**

### SCHWIMMEN BEI KLEINEN REYNOLDS-ZAHLEN



**Während das Spermium eines Zuchtbullens im Kreis schwimmt, vollführt sein Kopf eine Schlängelbewegung. Aus dieser lassen sich die Reibungskräfte berechnen [4]. Sie erlauben es dem Spermium, auch bei niedrigen Reynolds-Zahlen ohne Hilfe von Trägheitskräften zu schwimmen.**

Fortbewegung stellt für so kleine Schwimmer wie Spermien eine echte Herausforderung dar: Nach dem Reynoldsschen Gesetz der Physik wirkt eine Flüssigkeit für einen Schwimmer umso zäher, je kleiner dieser ist und je langsamer er sich bewegt. Dann werden nämlich Trägheitskräfte im Vergleich zu hydrodynamischen Reibungskräften verschwindend klein. Die Reynoldssche Zahl bewertet die Größenordnung von Trägheitskräften relativ zu Reibungskräften. Sie berechnet sich für einen Schwimmer der Größe  $L$ , der sich mit Geschwindigkeit  $v$  in einer Flüssigkeit der Dichte  $\rho$  und Viskosität  $\eta$  bewegt, als

$$Re = \frac{\rho L v}{\eta}$$

Strömungstechnikern ist diese Formel vertraut: Sie müssen bei Messungen im Strömungskanal mit verkleinerten Modellen ihre Messergebnisse entsprechend dem Reynoldsschen Gesetz

skalieren. Für einen Menschen im Wasser erhalten wir mit  $L = 1 \text{ m}$ ,  $v = 1 \text{ m/s}$ ,  $\rho = 1 \text{ kg/l}$ ,  $\eta = 0,001 \text{ kg/(m s)}$  für die Reynoldssche Zahl  $Re \approx 1000000$ . Damit dominieren Trägheitskräfte, und Menschen können schwimmen, indem sie sich am Wasser abstoßen.

Für ein schwimmendes Spermium ergibt dieselbe Rechnung mit  $L = 0,2 \mu\text{m}$  für den Durchmesser der Spermiengeißel – der sich als entscheidende geometrische Größe für die Erzeugung von Scherströmungen herausstellt – sowie einer Geschwindigkeit von  $v = 200 \mu\text{m/s}$  jedoch einen ungleich kleineren Wert  $Re \approx 0,001$ . Hier sind also Trägheitskräfte vernachlässigbar. Spermien sind so klein, dass ihnen selbst normales Wasser so dick wie zäher Sirup erscheint [11]. Um sich trotzdem fortzubewegen, nutzen sie geschickt unterschiedliche Reibungskräfte bei Vorwärts- und Seitwärtsbewegungen – wie Schlangen auf Sand.

Beim Spermium sorgt die Wellenbewegung der Geißel für eine Schlängelbewegung des Kopfes (Abbildung). Wir haben schwimmende Spermien mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet und konnten durch präzise Messung des „Kopfwackelns“ die hydrodynamischen Reibungskräfte bestimmen [4]. Dabei bewegt sich der Spermienkopf fast dreimal so schnell wie die mittlere „Reisegeschwindigkeit“ des Spermiums: Ohne hin- und her zu wackeln ist in zähen Flüssigkeiten kein Vorwärtskommen.

Ähnliches gilt, wenn man beim Einparken nur durch Vor- und Zurückstoßen in die enge Lücke gelangt. Tatsächlich stellen beide Fortbewegungsarten eine allgemeine Klasse mathematischer Steuerungsprobleme dar.

### Universelle Navigationsstrategie

Seeigelspermien sind nicht die einzigen Schwimmer, die mit Hilfe von Schraubenlinien navigieren [10]. Winzige Grünalgen, Riesenbakterien und Seesternlarven beispielsweise nutzen eine ganz ähnliche Strategie um Futter zu suchen oder sich an Lichtquellen zu orientieren. Hier benutzt die Natur eine erfolgreiche Idee gleich mehrfach. Die einzellige Grünalge *Chlamydomonas* schwimmt zwar entlang einer geraden Bahn, dreht sich aber permanent um ihre eigene Achse. Dabei rotiert auch ihr lichtempfindlicher Augenfleck

um die Zellachse wie ein Radarschirm. Falls die Grünalge senkrecht zu einer Lichtquelle schwimmt, empfängt der Augenfleck also ein periodisches Lichtsignal. Ein simpler Steuerungsmechanismus ähnlich dem der Seeigelspermien erlaubt es diesen Mikroschwimmern, sich gezielt zum Licht zu orientieren.

Nicht nur Seeigelspermien, auch menschliche Spermien reagieren auf Botenstoffe aus dem Eileiter. Ob sie aber dieselbe Navigationsstrategie wie Seeigelspermien verwenden, ist nicht geklärt. Eine Pille für den Mann, die den Spermien zuverlässig „stinkt“, wird noch etwas auf sich warten lassen.

### Zusammenfassung

Angetrieben von regelmäßigen Wellenbewegungen ihrer Geißel schwimmen Seeigelspermien entlang von gekrümmten Schwimmbahnen in Spirallinien. Dies erlaubt es den Spermien, eine chemische Fährte aufzunehmen und die Eizelle zu orten. Dabei verarbeitet das Spermium ein chemisches Signal der Eizelle mit einer ähnlichen „Hardware“ wie sie Nervenzellen verwenden. Entsprechend steuert das Spermium seine Schwimmbahn. Ein einfaches geometrisches Prinzip ermöglicht eine robuste Navigation. Auch viele andere Mikroschwimmer verwenden es.

### Stichworte

Spermien, Navigation von Kleinstschwimmern, Chemotaxis, Zellbewegung, molekularer Motor.

#### INTERNET

Programm zur Spermien-Navigation

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

(Special Features/ Zusatzmaterial zu den Heften)

### Literatur

- [1] U. B. Kaupp, N. D. Kashikar, I. Weyand, *Annu. Rev. Physiol.* **2008**, *70*, 93.
- [2] B. M. Friedrich und F. Jülicher, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **2007**, *104* (33), 13256.
- [3] J. Gray und G. T. Hancock, *J. Exp. Biol.* **1955**, *32*, 802.
- [4] B. M. Friedrich et al., *J. Exp. Biol.* **2010**, *213*, 1226.
- [5] M. Böhmer et al, *EMBO J.*, **2005**, *24* (15), 2741.
- [6] Kaupp et al., *Nature Review Neurosci.*, **2010**, *11*, 188.
- [7] T. Strünker et al., *Nat. Cell Biol.*, **2006**, *8* (10), 1149.
- [8] B. M. Friedrich und F. Jülicher, *New J. Phys.* **2008**, *10*, 123025.
- [9] B. M. Friedrich und F. Jülicher, *Phys. Rev. Lett.* **2009**, *103*, 068102.
- [10] H. S. Jennings, *Amer. Soc. Natural.* **1901**, *35*, 369.
- [11] E. M. Purcell, *Am. J. Phys.* **1977**, *45*, 3.
- [12] B. A. Afzelius et al., *Tissue and Cell* **1995**, *27*, 241.

### Die Autoren



Benjamin Friedrich studierte Mathematik in Leipzig und Cambridge. Er promovierte 2009 am Max-Planck-Institut für die Physik komplexer Systeme in Dresden. Seitdem arbeitet er als Postdoc am Weizmann-Institut in Israel. Für seine Doktorarbeit, deren Ergebnisse dieser Artikel vorstellt, erhielt er die Otto-Hahn-Medaille der Max-Planck-Gesellschaft.



U. Benjamin Kaupp ist Wissenschaftlicher Direktor des Center of Advanced European Studies and Research (caesar) in Bonn. Caesar ist eng mit der Max-Planck-Gesellschaft assoziiert. Zudem ist er Professor für Biophysikalische Chemie an der Universität zu Köln und für Molekulare Neurobiologie an der Universität Bonn. Er erforscht die Biophysik von Sinnesprozessen.

#### Anschrift

Dr. Benjamin M. Friedrich, Department of Materials and Interfaces, Weizmann Institute of Science Rehovot, Israel. [benjamin.friedrich@weizmann.ac.il](mailto:benjamin.friedrich@weizmann.ac.il)

Prof. Dr. U. Benjamin Kaupp, CAESAR, Ludwig-Erhard-Allee 2, D-53175 Bonn.