

KRAFTWERKE im Nanoreich

Milliardstel Meter große Generatoren könnten Nanosysteme kontinuierlich mit Strom versorgen, indem sie Energie aus ihrer Umgebung gewinnen, sei es aus Schallwellen, den Vibrationen einer Straße oder dem Strömen des Bluts im Körper. Damit würden neuartige Biosensoren und Nanoroboter für lange Zeit autark.

Von Zhong Lin Wang

In Kürze

- **Winzige Nanogeräte** besitzen ein riesiges Potenzial – vor allem dann, wenn wir sie mit Energiequellen ausstatten können, die die Nachteile von Batterien überwinden.
- **Ungenutzte Energiequellen** wie Vibrationen, Temperaturunterschiede oder sogar der menschliche Puls könnten genügend Energie bereitstellen, um solche winzigen Maschinen zu betreiben.
- **Nanogeneratoren könnten diese Energie »ernteten«** und in elektrische Energie umwandeln. Felder aus piezoelektrischen Nanodrähten liefern schon heute kontinuierlich Strom.
- Zu den wahrscheinlichsten Einsatzgebieten gehören **medizinische Anwendungen**. Nanogeneratoren könnten Akkus von Herzschrittmachern aufladen oder drahtlose Minisensoren versorgen, die – in den Körper implantiert – den Blutzuckerspiegel überwachen.

Der Uhrmacher, der in den 1920er Jahren die erste automatische Armbanduhr baute, hatte eine großartige Idee: Er »erntete« die zum Aufziehen der Feder nötige mechanische Energie aus den Armbewegungen des Trägers der Uhr. Die Faszination dieses Verfahrens wirkt heute noch fort. Mittlerweile haben wir begonnen, Nanogeneratoren zu entwickeln: extrem kleine Geräte in der Größenordnung von milliardstel Metern, die ebenfalls Energie aus ihrer Umwelt beziehen, sie in elektrische Energie umwandeln und damit winzige Nanomaschinen versorgen.

Sie könnten sich als äußerst nützlich für den kabel- und batterielosen Betrieb vielfältiger Nanosysteme erweisen. Beispielsweise sind nun implantierbare Biosensoren denkbar, die kontinuierlich den Blutzuckerspiegel von Patienten überprüfen, oder autarke Spannungssensoren, die Bauwerke wie zum Beispiel Brücken überwachen. Auch Sensoren für Umweltgifte könnten künftig ohne Batterien auskommen. Das Einsatzfeld solcher Geräte ist riesig. Zukünftige Nanoroboter, mikroelektromechanische Systeme (MEMS), Überwachungsanlagen für öffentliche Räume und natürlich tragbare elektronische Geräte – sie alle sind auf Autarkie bei der Energieversorgung angewiesen. Wahrscheinlich würden die winzigen Generatoren auch völlig neue Perspektiven eröffnen, über die wir heute nicht einmal nachdenken.

Zur Energieerzeugung auf einer Miniaturskala führen verschiedene Wege. Wissenschaftler versuchen unter anderem, Energie aus Vibrationen oder Bewegungen zu gewinnen, die vom Verkehr auf einer Straße herrühren. Auch mit Temperaturdifferenzen lässt sich arbeiten, wenn man beispielsweise die Tatsache ausnutzt,

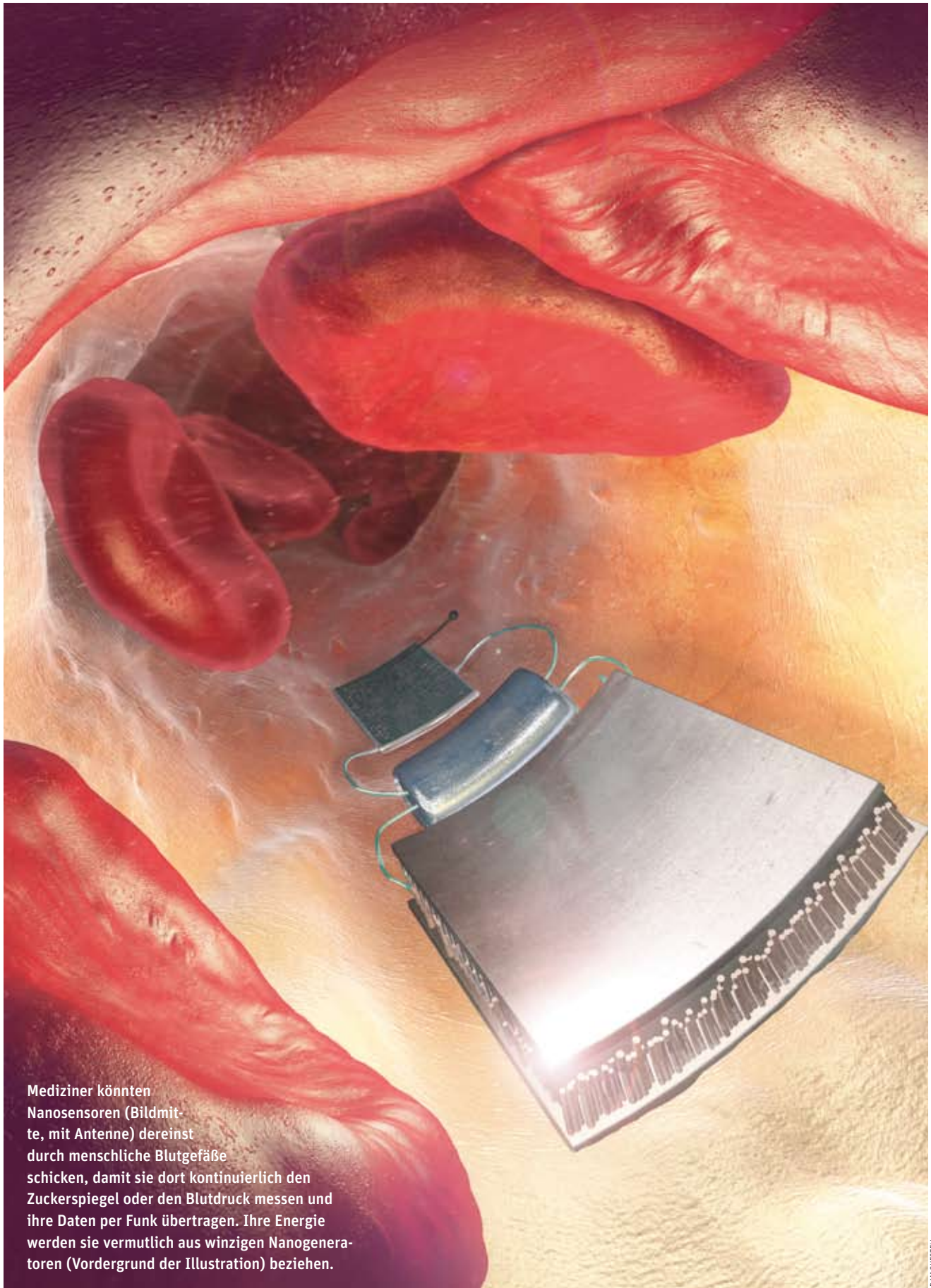
dass die Bodentemperatur einige Meter unter der Erdoberfläche recht konstant ist. Als Energiequellen werden mittlerweile selbst biochemische Prozesse, von außen eingestrahelter Ultraschall oder hörbare Schallwellen untersucht.

Nanosysteme wären ideale Abnehmer dieser Energie, denn ihr Leistungsbedarf liegt im Bereich von gerade einmal einigen Nanowatt bis Mikrowatt (milliardstel bis millionstel Watt) – so viel könnten Nanogeneratoren leisten. Man denke nur an die möglichen Energiequellen im menschlichen Körper: mechanische Energie, Wärmeenergie, die hydraulische Energie des Kreislaufs oder chemische Energie in Form von Glukose. Umgewandelt in elektrische Energie, würde bereits ein Bruchteil davon ausreichen, um verschiedenste winzige Geräte zu versorgen.

Energie aus dem Schuh?

Seit es in den späten 1990er Jahren immer attraktiver wurde, sich mit Fragen der Energieversorgung tragbarer elektronischer Geräte zu beschäftigen, haben Wissenschaftler schon große Fortschritte erzielt. Im Medienlabor des Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, USA, wurde zum Beispiel ein Schuh entwickelt, der den piezoelektrischen Effekt nutzt. Dabei entsteht an der Oberfläche bestimmter kristalliner Materialien eine elektrische Spannung, sobald sie unter Druck geraten. Die Energieausbeute ist allerdings zu gering, um Handys oder Organizer zu betreiben.

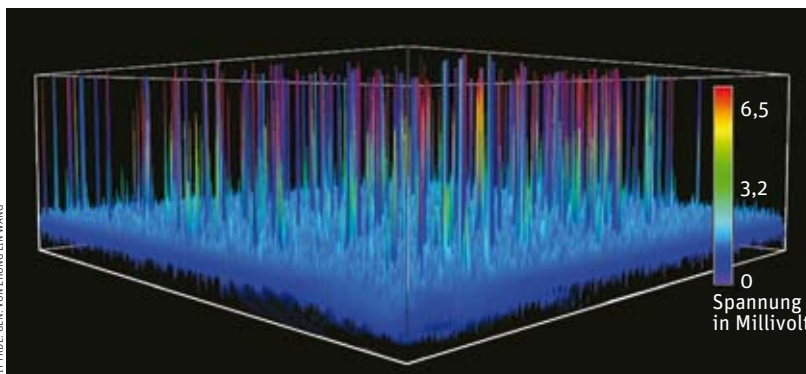
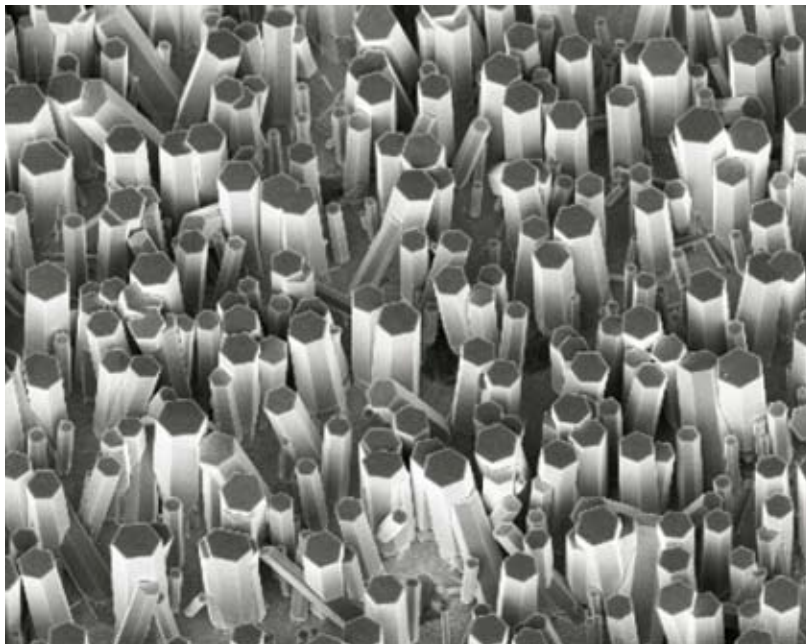
Viele Forscher verlegten ihre Anstrengungen daher auf die Stromversorgung von MEMS. Solche mikroelektromechanischen Systeme auf Siliziumbasis besitzen Abmessungen in der Größenordnung von millionstel bis tausendstel Metern und benötigen sehr wenig Energie. Längst sind sie zum Beispiel als Beschleunigungsmesser in Airbagsystemen



Mediziner könnten Nanosensoren (Bildmitte, mit Antenne) dereinst durch menschliche Blutgefäße schicken, damit sie dort kontinuierlich den Zuckerspiegel oder den Blutdruck messen und ihre Daten per Funk übertragen. Ihre Energie werden sie vermutlich aus winzigen Nanogeneratoren (Vordergrund der Illustration) beziehen.

ADAM QUISTELL

Ein Feld aus Zinkoxid-Nanodrähten, gesehen mit dem Rasterelektronenmikroskop (Bild oben). Die Drähte besitzen typischerweise Durchmesser zwischen 30 und 100 Nanometern und sind ein bis drei Mikrometer lang. Das Diagramm (unten) zeigt die Spannungsverteilung, die von einem solchen Feld erzeugt wird.



oder als Düsen in Tintenstrahldruckern im Einsatz.

In den vergangenen Jahren entwickelten Forscher zudem kleine, von Vibrationen angetriebene Generatoren, die neben dem piezoelektrischen Effekt auch elektromagnetische Phänomene ausnutzen. Dabei sorgen bewegliche Magnete oder Spulen dafür, dass Wechselströme induziert werden. Einige Mikrogeneratoren mit Abmessungen in der Größenordnung der MEMS wurden tatsächlich bereits hergestellt. Sie arbeiten mit Frequenzen zwischen 50 und 5000 Hertz, sind aber bis zu 75 Kubikzentimeter groß und damit vergleichsweise voluminös.

Zu den Bestandteilen eines typischen, von Vibrationen angetriebenen piezoelektrischen Generators gehört ein aus zwei übereinanderliegenden Schichten bestehender Streifen aus Bleizirkoniumtitanat. Der Streifen ist an einen Ende fixiert, während am frei schwingenden Ende eine Masse angebracht ist – vergleichbar einem Schwimmer auf einem federnden Sprungbrett. Biegt die Schwerkraft den Strei-

fen nach unten, gerät die obere Schicht unter Zugspannung, die untere dagegen unter Druckspannung. Dabei entsteht einerseits positives, andererseits negatives elektrisches Potenzial. Schwingt die Masse nun auf und ab, bildet sich eine Wechselspannung aus. Damit dieses Prinzip tatsächlich funktioniert, muss der Generator allerdings relativ groß sein – nur dann nämlich versetzt die Schwerkraft die Masse in ausreichend starke Schwingung.

Energien aus strömenden Körperflüssigkeiten

Auf der Nanoskala sieht das anders aus. Meine Forschungsgruppe am Georgia Institute of Technology in Atlanta, USA, arbeitet an winzigen piezoelektrischen Generatoren, bei denen die Schwerkraft, die eine so wichtige Rolle in der Welt des Großen spielt, ein vollkommen untergeordneter Akteur ist. Versuchte man, einen piezoelektrischen Generator mit Schwingungstreifen auf der Nanoskala zu konstruieren, trüge die Gravitation so gut wie nichts zu dessen Bewegung bei – das Gerät würde schlicht nicht funktionieren. Hier zählen stattdessen die Kräfte chemischer Bindungen und die gegenseitige Anziehung von Molekülen.

Unser Team erforscht daher neuartige Nanotechnologien, um andere Energieformen auszunutzen: mechanische Energie, wie sie bei Körperbewegungen und der Dehnung von Muskeln frei wird, Schwingungsenergie, die in akustischen und Ultraschallwellen enthalten ist, und hydraulische Energie von strömenden Körperflüssigkeiten wie zum Beispiel Blut. Dabei verfolgten wir im Lauf der Zeit ganz unterschiedliche Ansätze. In den späten 1990er Jahren konzentrierte sich unsere Forschungsarbeit auf Kohlenstoff-Nanoröhrchen, die damals im Mittelpunkt des Interesses standen. Wir erfanden einige Verfahren, um deren mechanische, elektrische und andere Eigenschaften in situ zu messen, also gewissermaßen live unter dem Mikroskop. Es gelang uns aber nicht, die elektrischen Eigenschaften dieser Nanoröhrchen in den Griff zu bekommen.

Dann stieß ich auf eine viel versprechende Alternative: Metalloxide könnten, so hoffte ich, die Basis einer völlig neuen Nanowelt werden. Im Jahr 2000 begann ich mit der Herstellung von »Nanogürteln«. Diese weißen, wolleartigen Produkte entstehen beim Backen eines Metalloxids wie etwa Zinkoxid bei 1200 Grad Celsius unter Anwesenheit von Argongas. Sie können als hochempfindliche Sensoren zum Einsatz kommen, da sich ihre Leitfähigkeit stark ändert, sobald einzelne Gas- oder Flüssigkeitsmoleküle an der Oberfläche andocken.

Mittlerweile aber arbeiten wir vor allem mit Nanodrähten aus Zinkoxid. Diese Nanodrähte stehen wie die Halme eines Kornfelds senkrecht nebeneinander. Jeder Draht ist eine perfekt sechsseitige Kristallsäule, die auf einem festen, elektrisch leitfähigen Substrat herangewachsen ist. Bei ihrer Herstellung hilft das VLS-Verfahren (VLS steht für »vapor-liquid-solid«, gasförmig-flüssig-fest) aus der Halbleitertechnologie. Wir platzieren Nanopartikel aus Gold, die als Katalysator für das Kristallwachstum dienen, nebeneinander auf ein Saphirplättchen. Am heißeren Ende eines Quarzrohrofens erhitzen wir Zinkoxidpulver. Ein Strom aus Argongas transportiert das verdampfte Pulver dann zu den zu Tröpfchen geschmolzenen Goldpartikeln. Der Zinkoxidampf kondensiert in den Goldtröpfchen und bildet kristalline Zinkoxidsäulen aus, die nach unten aus den Tröpfchen herauswachsen. Typischerweise sind solche Nanodrähte zwischen ein und drei Mikrometer lang und weisen Durchmesser zwischen 30 und 100 Nanometern auf.

Um den August 2005 herum kam mir schließlich die Idee, mechanische Energie mit Hilfe solcher Nanodrähte in Elektrizität umzuwandeln. Mit Hilfe eines Rasterkraftmikroskops vermaßen wir damals gerade die elektromechanischen Wechselwirkungen zwischen den Nanodrähten. Als wir die Säulen mit der feinen Mikroskopspitze »antippten«, beobachteten wir elektrische Spannungsspitzen, deren Ursprung wir uns nicht erklären konnten. Als wir sie den November hindurch systematisch untersuchten, wurde uns aber klar, dass sie dem piezoelektrischen Effekt des Zinkoxids zu verdanken sind. Andere Ursachen wie etwa statische Aufladung durch Reibung oder elektrische Spannungen durch den Kontakt unterschiedlicher Materialien konnten wir ausschließen.

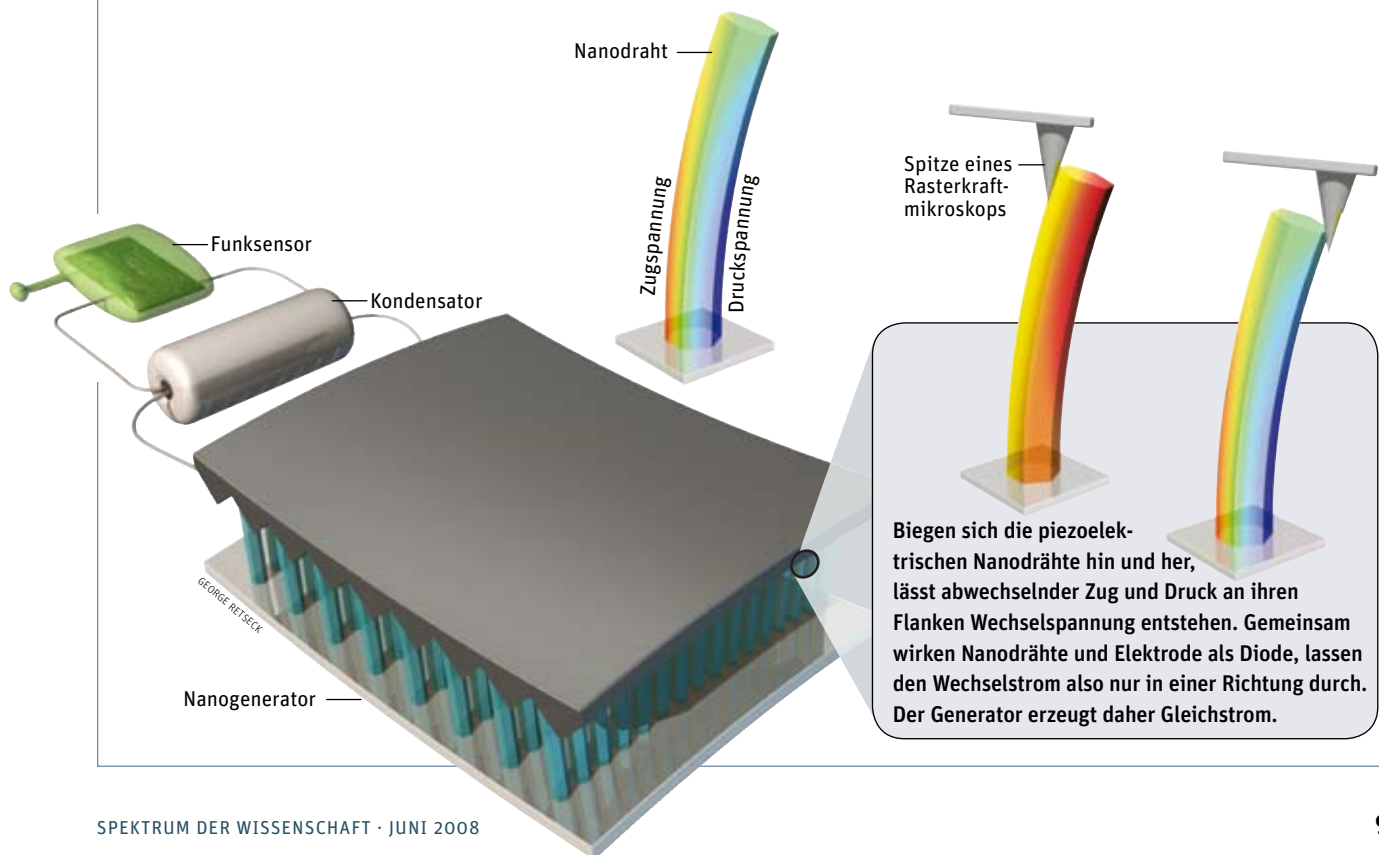
Der nächste Schritt war die Suche nach dem Prozess, der einzelne Nanodrähte anregt, elektrische Ladung abzugeben. In einem Buch über Halbleiterstrukturen fand ich die entscheidenden Hinweise und konnte schließlich den Mechanismus beschreiben, auf dessen Basis

Die entscheidende Idee war, mechanische Energie mit Hilfe von Nanodrähten in Elektrizität umzuwandeln

VON MECHANISCHER ZU ELEKTRISCHER ENERGIE

Ein Nanogenerator (unten) besteht aus einem Feld senkrecht angeordneter Zinkoxid-Nanodrähte. Die sechsseitigen Kristalle besitzen zugleich piezoelektrische und halbleitende Eigenschaften. Auf ihnen liegt eine rechteckige Elektrode mit einer gezackten Unterseite auf, die auf äußere Kräfte mit seitlichen Bewegungen reagiert. Die Kräfte können von Vibrationen, vom

menschlichen Puls oder von akustischen Wellen stammen. Ein Kondensator kann die vom Generator produzierte elektrische Energie zwischenspeichern beziehungsweise in regelmäßigen Abständen einen Sensor betreiben, der den Blutzuckerpegel oder den Blutdruck misst. Ein winziger Sender leitet die Daten schließlich an die Außenwelt weiter.





WIE VIEL ENERGIE PRODUZIERT UNSER KÖRPER?

BLUTFLUSS

0,93 Watt mechanische Leistung
0,16 Watt elektrische Leistung eines
Nanogenerators
0,16 Joule elektrische Energie pro Herz-
schlag

AUSATMEN

1,00 Watt mechanische Leistung
0,17 Watt elektrische
Leistung eines Nano-
generators
1,02 Joule elektrische Ener-
gie pro Atemzug

Einatmen

0,83 Watt mecha-
nische Leistung
0,14 Watt elektrische
Leistung eines Nanogenerators
0,84 Joule elektrische Energie
pro Atemzug

OBERE GLIEDMASSEN

3,00 Watt mechanische Leistung
0,51 Watt elektrische Leistung
eines Nanogenerators
2,25 Joule elektrische Energie
pro Bewegung

GEHEN

67,00 Watt mechanische Leistung
11,93 Watt elektrische Leistung
eines Nanogenerators
18,90 Joule elektrische Energie pro Schritt

TASTATURSCHREIBEN

6,9 bis 19,0 Milliwatt
mechanische Leistung
1,2 bis 3,2 Milliwatt elektrische Leistung
eines Nanogenerators
226 bis 406 Mikrojoule
elektrische Energie
pro Bewegung



GETTY IMAGES / TIM PLATT



GETTY IMAGES / PHOTODISC

unsere Nanogeneratoren seither funktionieren. Zinkoxid besitzt sowohl piezoelektrische als auch halbleitende Eigenschaften – eine seltene Kombination. Beide nutzen wir aus, um elektrische Ladungen in den Nanodrähten zu erzeugen und zu sammeln. Wir konnten nachweisen, dass in einem Zinkoxid-Nanodraht, der von der extrem dünnen Spitze eines Rasterkraftmikroskops verbogen wird, ein Feld mechanischer Spannung entsteht. Seine gedehnte Flanke weist dabei eine positive Zugspannung auf, die gestauchte Seite eine negative Spannung. Lassen wir die elektrisch leitende Mikroskopspitze über ein ganzes Feld solcher Nanodrähte streichen, kommt es bei jedem Kontakt zwischen ihr und einem Draht zu einer elektrischen Spannungsspitze. Grund dafür ist der piezoelektrische Effekt, der im Inneren des Nanodrahts ein elektrisches Feld zwischen den unterschiedlichen Potenzialen der gedehnten und der gestauchten Flanke entstehen lässt.

Kurz vor Weihnachten 2005 entwarf ich ein Experiment, um die elektrische Spannung, die an einem langen Nanodraht anliegt, mit Hilfe eines optischen und eines Rasterkraftmikroskops zu visualisieren. Gemeinsam mit meinem Studenten Jinhui Song gelang mir gegen Ende Dezember die Aufnahme einiger Videosequenzen, die einen direkten Nachweis der Gültigkeit meines theoretischen Modells darstellten. Dann bearbeiteten wir die Bilder und sandten schließlich einen Fachaufsatz an das US-amerikanische Wissenschaftsjournal »Science«.

Die nächste Herausforderung bestand darin, ein leistungsfähiges Design zu entwickeln. Drei Ziele strebten wir an. Zum einen mussten wir die Spitze des vergleichsweise riesigen Rasterkraftmikroskops durch einen in den Generator integrierten Gegenkontakt ersetzen. Außerdem mussten wir möglichst viele Nanodrähte so anregen, dass sie simultan und kontinuierlich Energie erzeugen. Und schließlich sollte sich der Generator von außerhalb mit Energie versorgen lassen, zum Beispiel in Form von Ultraschallschwingungen, um autark arbeiten zu können.

Zunächst entwickelte ich ein neues Design, in dem das Mikroskop durch eine an der Unterseite gezackte Elektrode ersetzt wurde. Mein Postdoktorand Xudong Wang musste fast vier Monate lang experimentieren, bevor er mit dem Versuchsaufbau die ersten Daten sammeln konnte. Er maß allerdings nur ein sehr kleines elektrisches Signal. Zwischen Mai und Oktober 2006 konzentrierten wir uns daher darauf, den Aufbau des Nanogenerators zu optimieren, um seine Leistung zu erhöhen. Gegen Ende des Jahres konnten wir ihn

schließlich der wissenschaftlichen Öffentlichkeit vorstellen.

Unser experimenteller Aufbau wies erstmals nach, dass ein Nanogenerator kontinuierlich elektrischen Gleichstrom liefern kann. Er besteht aus einem Feld von parallel nebeneinander stehenden Zinkoxid-Nanodrähten, das von einer platinbeschichteten Siliziumelektrode mit gezackter Unterseite überdeckt wird. Den Abstand der Elektrode zu den Nanodrähten können wir präzise kontrollieren.

Die Platinbeschichtung erhöht die elektrische Leitfähigkeit der Elektrode und verleiht ihr im Kontakt mit den Nanodrähten die Eigenschaften einer Diode. Wie ein Ventil lässt diese den Wechselstrom aus den hin- und herschwingenden Drähten in nur einer Richtung fließen, nämlich vom Metall zum Halbleiter. Bewegt sich die Elektrode seitlich, biegt ihre gezackte Unterseite die Drähte um – sie übernimmt also die Funktion vieler nebeneinander angeordneter Mikroskopspitzen.

Biokompatible Alternative gesucht

Seit Januar 2007 sind wir nun vollauf mit der Verbesserung unseres Nanogenerators beschäftigt. Die Keramik- oder Halbleitersubstrate, auf deren Oberflächen wir unsere Nanodrähte ursprünglich hatten wachsen lassen, sind hart und spröde und daher ungeeignet für Anwendungen, die eine faltbare oder biegsame Energiequelle benötigen. Biosensoren, die in Muskeln oder Gelenke implantiert werden sollen, oder Energiegeneratoren in Schuhen lassen sich so nicht realisieren. Als »biokompatible« Alternative bieten sich stattdessen elektrisch leitfähige Polymere an. In Experimenten fanden wir nämlich heraus, dass sich viele Plastiksubstrate eignen, um auf ihnen Zinkoxid-Nanodrahtfelder heranzuzüchten, die schließlich in mobilen und flexiblen Elektronikgeräten Anwendung finden könnten.

Durch die Flexibilität des Substrats bilden nun allerdings die Spitzen der Nanodrähte ein welliges Profil aus. Die Auflagefläche für die Elektrode ist also uneben, es kommt zu Fehlkontakten. Um den Generator leistungsfähiger und damit fit für den Einsatz zu machen, müssen wir die Effizienz der elektrischen Entladung noch verbessern, indem wir die Stärke der Verbindung zwischen Nanodrähten und Substrat und zudem die Abstände zwischen den Drähten optimieren.

Die großtechnische und kostengünstige Herstellung der Nanodrahtfelder liegt im Bereich des Möglichen, weil dazu keine teuren Hochtemperaturprozesse nötig sind. Die eigentlichen Hürden liegen derzeit noch anderswo. Wir müssen lernen, wie wir die Nanodrähte perfekt gleichmäßig wachsen lassen und ihre

ERNTEN VON ENERGIE AUS DER UMWELT

Neben piezoelektrischen Nanogeneratoren gibt es weitere Möglichkeiten, der Umwelt Energie zu entziehen. Die effizientesten Ernteprozesse sind in der Natur selbst entstanden. Derek R. Lovley und seine Mitarbeiter an der Universität von Massachusetts in Amherst (USA) entdeckten zum Beispiel eine besondere Fähigkeit des auf dem Meeresgrund lebenden Bakteriums *Desulfuromonas acetoxidans*: Es kann Elektronen aus Essigsäure, die von anderen Organismen in den Sedimenten ausgeschieden wurde, zu Grafitelektroden transportieren. Den entstehenden Strom kann man zu einer zweiten Elektrode fließen lassen (Bild). Solche Sedimentbatterien könnten zum Beispiel giftige Abfälle biologisch abbauen. Auf ähnliche Weise könnten Mikroorganismen Elektrizität durch katalytische Reaktionen mit verschiedenen Kohlenhydraten und anderen Stoffen produzieren.



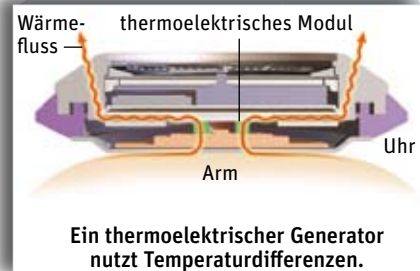
Meeresorganismen treiben eine Sedimentbatterie an.

2004 stellte eine Gruppe um A.K. Shukla am Zentralen Elektrochemischen Forschungsinstitut in Südindien den Prototyp einer biologischen Brennstoffzelle vor. Sie nutzt organische Stoffe und Stoffwechselprozesse, um Strom zu erzeugen. Tatsächlich lassen sich die Ressourcen unseres Körpers einschließlich der Stoffwechselprozesse unserer Zellen anzapfen, um mit der gewonnenen Energie medizinische Geräte wie Herzschrittmacher, Systeme zur kontrollierten Gabe von Medikamenten und winzige Diagno-

sesensoren zu betreiben. Mikrobiische Brennstoffzellen sind allerdings vergleichsweise groß; auch reicht ihre Leistung für Anwendungen außerhalb der Biologie möglicherweise nicht aus.

Eine weitere Option sind thermoelektrische Generatoren, die den Seebeck-Effekt ausnutzen: Verbindet man die Enden zweier Streifen aus verschiedenen Metallen, die unterschiedliche Temperaturen aufweisen, entsteht ein elektrisches Potenzial, weil Elektronen von der warmen zur kalten Seite der Metallstreifen wandern und dabei positiv geladene Ionen hinterlassen. Die thermoelektrische Spannung ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen.

Obleich auch die Thermoelektrik ein faszinierendes Arbeitsgebiet ist, sind entsprechende Generatoren doch ziemlich groß, schließlich müssen ihre Enden eine ausreichend hohe Temperaturdifferenz aufweisen. Als Energiequellen von Nanosystemen sind sie daher nur eingeschränkt nützlich. Trotzdem findet das Prinzip schon kommerzielle Anwendung wie in der 1998 entwickelten und in einer Sonderserie auf den Markt gebrachten Armbanduhr Seiko Thermic. Ihre thermoelektrischen Module erzeugen aus dem geringen Temperaturgefälle zwischen dem Arm des Trägers und der Umgebung genügend Leistung im Mikrowattbereich, um die Uhrmechanik anzutreiben. >> Z. L. W.



Lebensdauer verlängern können. Das derzeitige Modell unseres Nanogenerators arbeitet fünfzig Stunden lang, dann versagt es. Ursache dafür ist vermutlich das Verfahren, mit dem wir die Elektrode auf das Feld aus Nanodrähten aufsetzen. Drückt sie beispielsweise zu fest auf die Drähte, entsteht kein Strom.

Fortschritte haben wir bereits bei der Verbindung zwischen Nanodrähten und Substrat gemacht. Beim Prozess zur Herstellung der Felder wird auf das Substrat ein dünner Goldfilm aufgedampft. Das Gold fungiert dann in der schon beschriebenen Weise als Katalysator: Es lässt Zinkoxidkristalle wachsen, so dass am Schluss ein regelrechter Kristallwald aus Bäumen ohne Zweige entsteht. Die »Wurzeln« dieses Nanowalds können wir mittlerweile besser in das Substrat einbetten, indem wir, nachdem die »Bäume« gewachsen sind, eine zusätzliche dünne Polymerschicht darauf aufbringen.

Mit einem sechs Quadratmillimeter großen Generator erreichen wir inzwischen eine Betriebsspannung von 10 Millivolt und eine Stromstärke von 800 Nanoampere. Wir konnten auch nachweisen, dass sich solche Generatoren wie übliche Batterien oder Brennstoff-

zellen verhalten: Sie lassen sich in Reihe schalten, um die Ausgangsspannung zu steigern, eine Parallelschaltung erhöht dagegen den Ausgangsstrom. Um höhere Spannungen pro Generator zu erzielen, müssen wir nun aber alles daransetzen, Nanodrähte gleicher Höhe und gleicher Durchmesser herzustellen.

Trotzdem: Auch künftige Nanogeneratoren werden vermutlich nicht einmal eine Taschenlampe mit Strom versorgen können, ihre Leistung wird immer sehr gering bleiben. Für Geräte aber, die nur gelegentlich aktiv werden – wie zum Beispiel Sensoren, die in jeder Minute nur eine Sekunde lang Daten sammeln und übertragen – könnten Felder aus Nanodrähten ideale Energieversorger sein. Sicherlich aber werden Nanogeneratoren eingesetzt werden, um jene Energie zu gewinnen und zu recyceln, die wir tagtäglich verschwenden, ob sie nun vom Luftdruckwechsel im Autoreifen, von den mechanischen Vibrationen eines fahrenden Autos oder sogar von der flatternden Stoffwand eines Campingzelts herührt. Man muss nicht lange suchen, um die vielen kleinen Energiequellen überall um uns herum aufzuspüren – es wird Zeit, dass wir viele von ihnen auch nutzen. <



Zhong Lin Wang ist Direktor des Zentrums zur Charakterisierung von Nanostrukturen am Georgia Institute of Technology in Atlanta, USA. 1998 entwickelte er eine Nanowaage, die weltweit kleinste ihrer Art, und entdeckte im Jahr 2000 den »Nanogürtel«. Zu seinen vielen Auszeichnungen gehört die Burton-Medaille der Microscopy Society of America des Jahres 1999.

Gao, P.X. et al.: Nanowire Piezoelectric Nanogenerators on Plastic Substrates as Flexible Power Sources for Nanodevices. In: Advanced Materials, Bd. 19, S. 67–72, 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/951090.