

# ROBOTIK

Wem gehört die Zukunft?

## **Mini-Roboter**

Klein ist das neue Schwarz

## **Octobot**

Künstliche Weichtiere

## **Verhaltenssteuerung**

Gehorsam verweigert





Mike Beckers  
E-Mail: [beckers@spektrum.de](mailto:beckers@spektrum.de)

Liebe Leserin, lieber Leser,  
früher habe ich mich vor einem Aufstand überlegener intelligenter Maschinen gefürchtet, die genau wissen, was sie tun. Nicht, dass die Gefahr gebannt wäre – immerhin sind Killerroboter, die Menschen ins Visier nehmen, kurz vor dem Sprung vom Labor aufs Schlachtfeld. Aber meine aktuelle Angst gilt eher Robotern, die uns durch Fehlschlüsse gefährden. Wir geben in immer mehr Bereichen an Maschinen ab, denen wir noch nicht zuverlässig beibringen können, Wichtiges von Unwichtigem zu unterscheiden. Was, wenn die mechanischen Geschöpfe stets genauso fehlbar bleiben wie ihre Programmierer?

Auf Kooperation statt Konfrontation hofft

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 02.07.2018

Folgen Sie uns:



**CHEFREDAKTEURE:** Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert  
**REDAKTIONSLEITER:** Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl  
**ART DIRECTOR DIGITAL:** Marc Grove  
**LAYOUT:** Oliver Gabriel, Marina Männle  
**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**BILDREDAKTION:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**PRODUKTMANAGEMENT DIGITAL:** Antje Findekle, Dr. Michaela Maya-Mrschtik  
**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15-17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, USt-Id-Nr. DE229038528  
**GESCHÄFTSLEITUNG:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**MARKETING UND VERTRIEB:** Annette Baumbusch (Ltg.)  
**LESER- UND BESTELLSERVICE:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

**BEZUGSPREIS:** Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer  
**ANZEIGEN:** Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de).

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2018 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

SEITE

04

ROBOTIK

Klein ist das neue Schwarz

BILLYFOTO / GETTY IMAGES / ISTOCK

SEITE

28

KÜNSTLICHE EMOTIONALE INTELLIGENZ  
Das richtige Gefühl

FREDERIC OSADA AND TEDDY SEGUIN/DRASSM

HAPTISCHES FEEDBACK

Wann ersetzt der Roboter den Menschen?

SEITE

33

VERHALTENSSTEUERUNG  
Gehorsam verweigert

SEITE

39

JUST\_SUPER / GETTY IMAGES / ISTOCK

FRANK / ISTOCK.ADOBE.COM

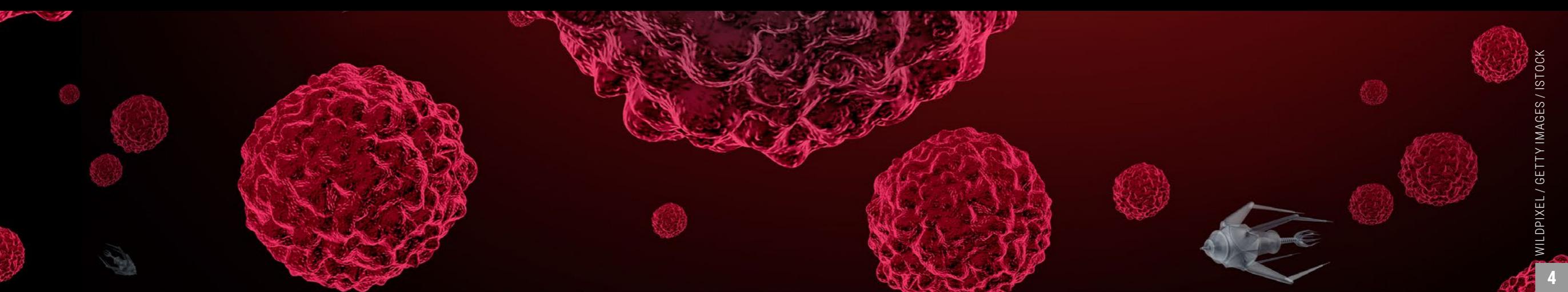
- 04 MINIATUR-ROBOTER  
Klein ist das neue Schwarz
- 12 OCTOBOT  
Künstliche Weichtiere
- 18 ARBEITSWELT  
Keine Angst vor Autonomen
- 23 KÜNSTLICHE INTELLIGENZ  
Liebe und Sex mit Robotern
- 28 KÜNSTLICHE EMOTIONALE INTELLIGENZ  
Das richtige Gefühl
- 33 HAPTISCHES FEEDBACK  
Wann ersetzt der Roboter den Menschen?
- 39 VERHALTENSSTEUERUNG  
Gehorsam verweigert
- 46 INITIATIVE GEGEN AUTONOME KILLER-ROBOTER  
»Ein Wettrüsten wird sich nicht verhindern lassen«
- 52 WEICHROBOTIK  
Silikon und Alkohol für künstliche Muskeln
- 55 MÜLLPROBLEM IM ORBIT  
Geckofinger sollen Weltraumschrott schnappen
- 58 JAPANISCHE ROBOTERINNOVATION  
Fliegender Supergel-Pinselroboter versucht, Bienen zu ersetzen
- 61 DROHNEN IN DER LANDWIRTSCHAFT  
Walmart patentiert Roboter-Biene
- 63 LOBES DIGITALFABRIK  
Roboter als Familienmitglieder



ROBOTIK

# KLEIN IST DAS NEUE SCHWARZ

von Eva Wolfangel



Roboterforscher entdecken ihre Liebe zu Miniatur-Robotern. Die Mini- und Mikro-Winzlinge könnten sich eines Tages durch unsere Körper bewegen und Medizin ausliefern. Sie könnten in großen fliegenden Schwärmen Verschüttete aufspüren oder Orte kartieren, die für Menschen oder große Roboter schwer zugänglich sind.

**M**it diesem Roboter kann man herrlich spielen! Wenqi Hu zeigt ihn in einer Petrischale, die leer ist bis auf dieses winzige Plättchen, das erst reglos am Boden liegt. Dazu reicht der Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme in Stuttgart einen Magneten – und schon kommt Leben in das kleine Wesen: Es biegt sich zu einer Art Halbmond – erst in die eine, dann in die andere Richtung, und schafft es so, sich fortzubewegen. Dreht man den Magneten, rollt es sich zusammen oder kriecht wie eine Raupe. Das vier Millimeter lange Plättchen scheint auf einmal lebendig zu sein.

Dieser Roboter, der kürzlich im Fachjournal »Nature« vorgestellt wurde, ist nur die Speerspitze einer wachsenden Bewegung: Immer mehr Forscher beschäftigen sich mit winzig kleinen Robotern. Und

auch, wenn man schon beim Plättchen des MPI stets Angst haben muss, es zu verlieren: Es gehört bei Weitem nicht zu den kleinsten existierenden Robotern. Denn diese spielen mittlerweile auf Nanoebene, in der Größe zweier Blutzellen.

Das Revolutionäre an der neuesten MPI-Entwicklung ist seine Fortbewegungsart, erklärt Metin Sitti, Direktor der Abteilung für Physische Intelligenz. »Die Idee, einen Roboter zu bauen, der sehr klein und obendrein weich ist, ist neu. Doch nur durch diese Eigenschaft kann er sich auf viele Arten fortbewegen: Der Trick ist die Formveränderung.« Das 0,1 Millimeter dünne Gerät besteht lediglich aus einer Art Gummi, in das verschiedene Magnetpartikel eingearbeitet sind. Dank dieser reagiert es auf magnetischen Einfluss.

Und natürlich bleibt es nicht dabei, dass man den Roboter händisch steuert, indem man einen Magneten um ihn herumbe-

wegt. Im Labor zeigt Wenqi Hu einen schrankgroßen Aufbau mit diversen Spulen, die ein Magnetfeld aufbauen, das er vom Computer aus dirigiert. In die Mitte legt er die Petrischale mit dem kleinen Roboter – diesmal schließt er sie wohlweislich mit einem Deckel. Denn kaum hat Hu ein paar Befehle am Rechner eingegeben, schon hüpfert das kleine Ding wie ein winziger Flummi. Die nächste Einstellung lässt es kriechen wie eine Raupe, und als Hu die Petrischale gegen ein mit Wasser gefülltes Gefäß austauscht und ein anderes Programm startet, beginnt der Roboter mit seinen beiden Enden zu schlagen wie ein Kolibri mit den Flügeln – und schwimmt so vom Boden an die Wasseroberfläche.

»Er kann tauchen, schwimmen, laufen, kriechen, krabbeln, hüpfen und rollen«, sagt Metin Sitti stolz: Insgesamt sieben Fortbewegungsarten hat der kleine Roboter drauf, abgeschaut von der Natur, unter

anderem von Käfern, Raupen und Quallen. Auch das ist selten für Roboter, sogar für große, wie Sitti betont: »Die meisten Roboter sind sehr spezialisiert, sie können sich nur in einem bestimmten Gelände bewegen.« Kaum einer kann auch nur laufen und schwimmen. Doch diese Fertigkeiten wird Sittis kleiner Roboter brauchen, wenn er tatsächlich dort unterwegs sein wird, wo ihn seine Erfinder in Zukunft sehen: im menschlichen Körper. Er soll eines Tages Medizin im Körper ausliefern, und zwar ganz genau dorthin, wo sie gebraucht wird. »Bislang kann man zwar an viele Stellen innerhalb des Körpers gelangen, beispielsweise mittels sehr kleiner Katheter«, sagt Sitti. Der Haken solcher Lösungen: Sie sind immer angebunden, sie haben alle eine Leitung nach draußen und sind von daher begrenzt in ihrer Bewegungsfreiheit. »Wenn wir Roboter bauen, die sich frei bewegen können, können wir alle Stellen im Körper erreichen.«

Sitti kooperiert mit Ärzten an der Tübinger Uniklinik: »Sie sind sehr angetan.« Die Vorteile liegen auf der Hand. Noch nimmt man Medikamente meist über die Blutbahn auf, »doch das verursacht Nebenwirkungen, weil sie nicht nur dorthin ge-

langen, wo sie gebraucht werden«. Der kleine Roboter kann eine gewisse Menge an Medizin transportieren, entweder in einer winzigen Tasche, die sich am Ziel durch eine gezielte Formänderung öffnet, oder indem er die Medizin absorbiert und sich am Ziel mittels Formveränderung selbst auswringt wie ein Schwamm.

### **Roboter waren schon fast überall, jetzt wollen die Robotiker den menschlichen Körper erobern**

Bradley Nelsons Vision ist beinahe so alt wie er selbst: In einem TED-Talk zeigt der Forscher der ETH Zürich einen Hollywoodfilm von 1966: »Fantastic Voyage«. Darin werden Mediziner samt U-Boot geschrumpft, um dann als Winzlinge im Gehirn eines Mannes ein Blutgerinnsel zu entfernen. Während die Männer tapfer wie Krieger gegen Blutzellen kämpfen, präsentiert Nelson grinsend ein Plättchen auf der Fingerspitze, noch kleiner als das von Sitti, doch sonst ähnlich. Dieser Miniroboter soll Medizin in den Augapfel transportieren, ebenfalls angetrieben durch ein externes, computergesteuertes Magnetfeld. Er wird mittels einer sehr feinen Nadel injiziert, die das Auge kaum verletzt – schließlich ist

er nur ein Drittel Millimeter dick und knapp zwei Millimeter lang. »Und das ist der größte Roboter, den wir machen«, erklärt Nelson weiter.

Normalerweise arbeitet er in einem 1000-mal kleineren Maßstab, was von Vorteil sei, da man umso weniger magnetische Kraft benötige, je kleiner der zu bewegende Roboter ist. Aber es hat auch Nachteile: Die Physik verändert sich. Nelson demonstriert das anhand eines Roboterfisches, der sich in normaler Größe mittels seiner Schwanzflosse voranbewegt. Die Natur ist ein beliebtes Vorbild für Robotiker, weil die Evolution hochangepasste und effiziente Methoden der Fortbewegung hervorgebracht hat – doch Nelsons Beispiel zeigt, dass das nur funktioniert, wenn man sich an die Größenmaßstäbe hält. Denn Oberflächeneffekte spielen eine viel größere Rolle, wenn die Roboter winzig klein sind – sie werden im Verhältnis stärker und können den Roboter lähmen. Es ist, wie wenn der Fischroboter in Sirup schwimmen müsste: Er kommt nicht von der Stelle. Folgerichtig nehmen sich Nanorobotiker kleinere Strukturen der Natur zum Vorbild, im Fall der ETH-Forscher Bakterien, beispielsweise das *E.-coli*-Bakterium. Dieses bewegt

sich durch Flüssigkeiten dank einer rotierenden Spirale, dem so genannten Flagellum. Das künstliche Flagellum eines der Züricher Nanoroboter, der nur doppelt so groß ist wie eine rote Blutzelle – und der neben einem menschlichen Haar unter dem Mikroskop wie eine Maus neben einem Autobahnbrückenpfeiler wirkt –, wird von einem rotierenden Magnetfeld in Bewegung versetzt.

Ein Anwendungsszenario, in das besonders viel Hoffnung gesetzt wird, ist die Krebsbehandlung. Schließlich fallen hier Nebenwirkungen extrem stark ins Gewicht, die mit einer gezielteren Medikamentenabgabe verringert werden können. Nelson experimentiert in diesem Zusammenhang unter anderem mit großen Schwärmen von Nanorobotern mit dem Ziel, dass diese beispielsweise einen Tumor umzingeln und Medizin frei geben. 2014 injizierte er einen Schwarm von 80 000 solcher Roboter in den Magen einer Maus, wo er sie an bestimmte Orte steuerte und sie einen Wirkstoff abgaben. Wenn Nelson seine Nanoroboter mittels eines gefilmten Blicks durchs Mikroskop in Aktion zeigt, wirken sie wie perfekte Synchronschwimmer. »Dafür wollen wir eine Medaille bei der nächsten



Olympiade«, scherzt er. Bis jetzt hat es immerhin für einen Eintrag ins Guinness-Buch der Rekorde gereicht, im Jahr 2012 für den kleinsten medizinischen Roboter.

Doch bis Roboter durch unsere Körper schwimmen und Medikamente verteilen, vergehen wohl noch einige Jahre. Die meisten Projekte sind bis jetzt kaum über die Grundlagenforschung hinaus, auch Sitti hat seinen neuesten Roboter bislang lediglich durch ein Stück Hähnchenfleisch navigiert und per Ultraschall beobachtet – das allerdings mit Erfolg, wie er betont. Er schätzt, dass erste medizinische Pilotstu-

## HOCHBEWEGLICHE MASCHINENPLÄTTCHEN

**Dieser Roboter haben sieben Fortbewegungsarten drauf: Sie bewegen sich je nach Anforderung wie Käfer, Raupen oder Quallen.**