



66

Doppelter Nutzen: An zweibeinigen Robotern untersucht ein Stuttgarter Max-Planck-Team die Biomechanik etwa von Laufvögeln. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse helfen den Forschenden auch, den Gang von Robotern zu verbessern.

FOTO: WOLFRAM SCHEIBLE, FÜR MPG

LAUF, ROBOTER!

TEXT: DAVID HOLZAPFEL

Gehen und laufen, ohne zu stolpern, das ist für zweibeinige Roboter vor allem in unebenem Gelände noch immer eine Herausforderung. Künftig könnte es ihnen jedoch leichter fallen: Ein Team um Alexander Badri-Spröwitz, Forschungsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme, hat einen Laufroboter konstruiert, der von Laufvögeln inspiriert ist. In Zukunft könnten solche Maschinen auf Baustellen, in der Landwirtschaft oder auch bei Missionen der Raumfahrt zum Einsatz kommen.

Alexander Badri-Spröwitz setzt den Roboter auf das Laufband. Noch hält er ihn mit einer Hand fest. Die beiden Beine der Maschine strampeln im Takt ihrer Elektromotoren, es sieht aus, als wollte sie sich aus dem Griff des Forschers befreien. Badri-Spröwitz schaltet das Laufband ein. Er tippt auf einem Laptop herum. Der Roboter zuckt etwas unkoordiniert, zieht sein linkes Bein nach. „Er ist heute ein bisschen schüchtern“, sagt der Wissenschaftler und blickt auf den Bildschirm. Nächster Versuch. Die Maschine läuft. Ein wenig ungenau bewegt sie sich Schritt für Schritt über das Laufband – zumindest für

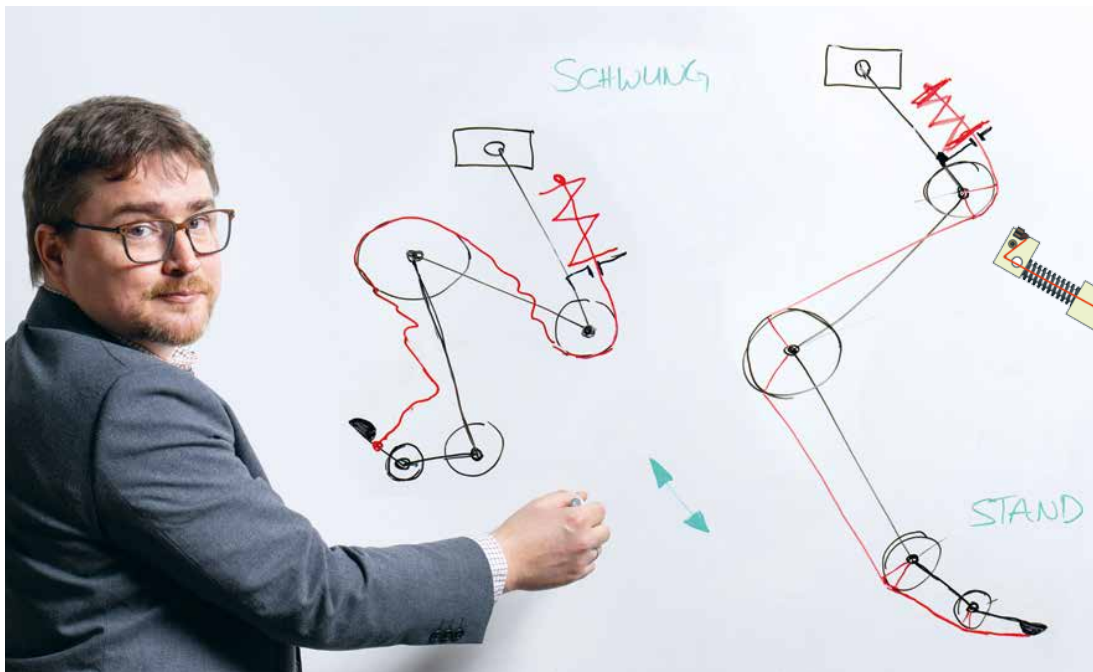
einige Sekunden. Dann fängt sie an zu hinken. Badri-Spröwitz nestelt am linken Bein des Roboters herum. Dann hat er das Problem gefunden: Der Kniemotor zieht nicht richtig. Eine kleine Justierung, schon läuft BirdBot wieder los – und diesmal hinkt er nicht.

BirdBot, so heißt das System von Roboterbeinen, das Badri-Spröwitz und sein Team am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme in Stuttgart entwickelt haben. Die Forschenden vereinen Biologie und Robotik im Bereich der Biomechanik. Sie wollen die Natur besser verstehen. Und von ihr lernen. Geht es nach Alexander Badri-Spröwitz, so könnte BirdBot der Prototyp sein für eine neue Art von Laufrobotern. Energieeffizienter als bisherige Roboter könnten diese in Zukunft zum Beispiel auf Baustellen schwere Lasten tragen. Anstelle von großen Maschinen mit viel Gewicht und mächtigen Rädern laufen mög-

licherweise bald leichtfüßige Roboter auch über Felder und Äcker. Sie könnten Äpfel ernten oder bei der Weinlese helfen. Auch in der Raumfahrt sieht Badri-Spröwitz Einsatzmöglichkeiten. „Wir glauben, dass ein Roboter über mobile Solarmodule mit genügend Energie versorgt werden kann, um den Mond oder den Mars zu erkunden oder beim Bau einer Mondstation zu helfen.“ Zweibeinige Roboter sind dabei leichter als vier- oder sechsbeinige, brauchen weniger Platz – etwa zwischen Bäumen oder Regalen – und können, wenn sie als humanoide Roboter mit Armen ausgestattet sind, meistens höher greifen. Der Mechanismus von BirdBot lässt sich aber auch in mehrbeinigen Maschinen einsetzen.

Biologen wissen schon lange, dass Tiere sehr energieeffizient laufen, springen, fliegen und schwimmen. Seit es Leben auf unserem Planeten gibt, hat die Evolution zahllose Lösungen für





Spannende Sache: Alexander Badri-Spröwitz skizziert die entscheidende Neuerung an BirdBot. Diese besteht darin, dass sich eine Sehne (rot) von einer Feder am Oberschenkel über alle Gelenke bis zum Fuß des Roboters zieht. Im Stand (rechte Skizze) sind Sehne und Feder gespannt, sodass kein Motor nötig ist, um das Gewicht zu tragen. Wenn BirdBot sein Bein anzieht (linke Skizze und Grafik), klappt er den Fuß nach hinten. Dann entspannen sich Sehne und Feder, und der Roboter kann das Bein mit relativ wenig Kraftaufwand anziehen.

68

alle möglichen Herausforderungen gefunden. Dabei hat die Natur auch schon viele der Probleme gelöst, die sich uns heute in der Technik stellen. Wir müssen nur aufmerksam hinschauen.

Da sind zum Beispiel der Strauß und der Emu. Laufvögel wie sie sind mechanische Wunderwerke. Sie wiegen teils über 100 Kilo und rennen doch mit einer Geschwindigkeit bis zu 55 Kilometern pro Stunde durch die Savanne. Ein früher Erfolg der Evolution, denn schon vor 66 Millionen Jahren lief ein Tyrannosaurus Rex, sechs bis sieben Tonnen schwer, mit einer fast identischen Beinstruktur.

Doch die Wissenschaft weiß erstaunlich wenig darüber, wie sich die Tiere im Detail bewegen. Es gibt viel Forschung dazu, aber auch noch sehr viele Fragen. Biomechaniker beschreiben zwar Bewegungsabläufe und messen Kräfte und Gelenkbewegungen. „Doch vieles ist noch un-

klar“, sagt Badri-Spröwitz. Wie funktionieren die Muskeln? Wie nutzen sie Energie? „Warum die Tiere so energieeffizient sind, das ist bei Weitem noch nicht erklärt.“

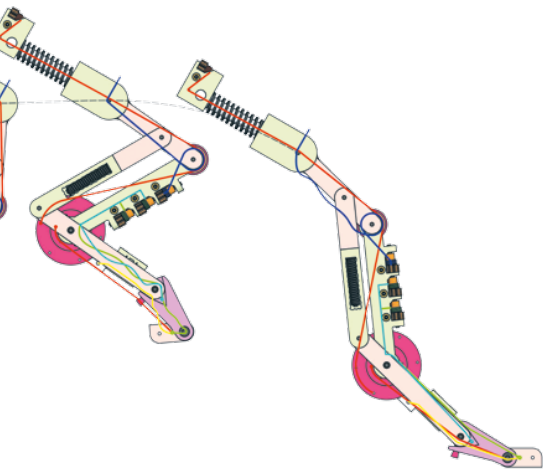
Vom Emu-Kadaver zum Robotermodell

Und es gibt einige Entwicklungen, die auf den ersten Blick wie Kuriositäten wirken: Anders als Menschen klappen viele Vögel den Fuß nach hinten, während sie das Bein zum Körper hochziehen. Doch die Natur macht nichts zufällig. Warum also tun die Tiere das? Ist diese Fußbewegung beim Gehen und Rennen vielleicht besonders energieeffizient? BirdBot soll Antworten auf solche Fragen liefern.

Auch der Laufroboter selbst profitiert davon. Denn immer wieder wurde er nach neuen Erkenntnissen, beispielsweise warum genau sich Laufvögel so

effizient fortbewegen, optimiert – dabei waren weitere Fragen zu beantworten. Etwa: Wie lässt sich der Aufbau der Vogelbeine mit all ihren Knochen, Muskeln und Sehnen auf Laufroboter übertragen? Seit mehreren Jahren forscht Badri-Spröwitz dazu. Das vorläufige Ergebnis steht nun vor ihm in seinem Stuttgarter Labor. BirdBot ist rund 35 Zentimeter hoch, mit seinen langen Beinen, den Elektromotoren und den Plastikbauteilen sieht er ein bisschen aus wie ein futuristisches Kinderspielzeug.

Die Geschichte des Roboters beginnt im Jahr 2014. Badri-Spröwitz sitzt in einem Labor am Royal Veterinary College in London. Auf dem Seziertisch vor ihm liegt der Kadaver eines Emus; ein wuchtiges Tier – einer der größten Laufvögel der Welt. Alexander Badri-Spröwitz bewegt ein Gelenk am Bein des Vogels, und zu seiner Überraschung sieht er, dass sich die anderen Gelenke mitbewegen. Ungefähr so,



Inspiziert von einem ungesicherten Vorbild: Der Gang von BirdBot ähnelt dem eines Laufvogels (hier: ein Strauß). Ungeklärt ist allerdings noch, ob der Vogel den Fuß ebenfalls zu dem Zweck zurückklappt, eine Sehne zu entspannen und damit beim Laufen Energie zu sparen.

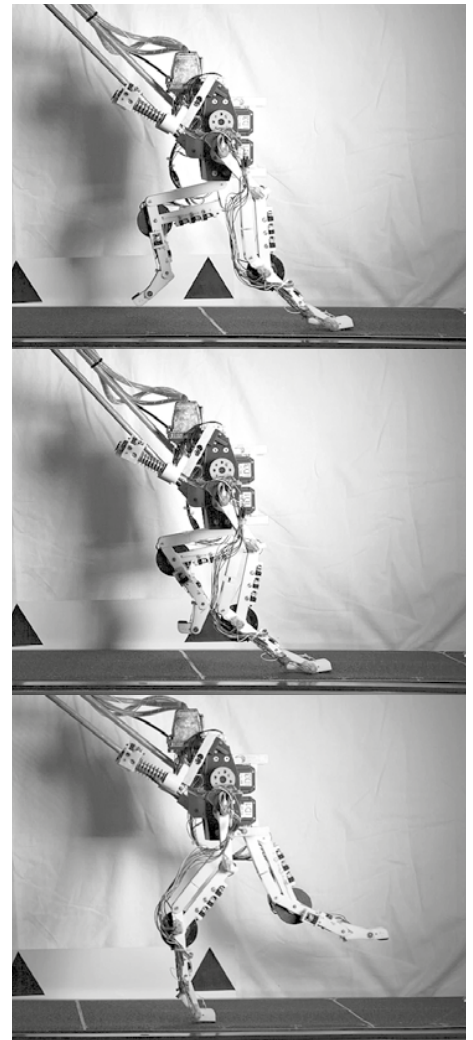
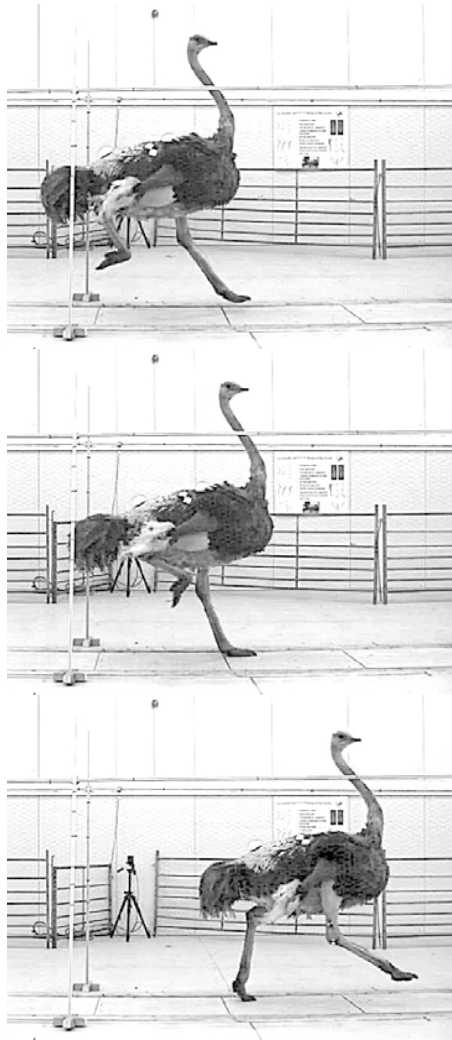


BILD: DLG MPI-IS & UC IRVINE UND MONICA DALEY, RVC

wie wenn man bei einer Marionette mehrere Fäden gleichzeitig zieht. Weil das Tier tot ist und folglich keine neuronalen Reflexe mehr zeigen kann, ist Badri-Spröwitz davon überzeugt, dass die Gelenke des Emus durch Sehnen mechanisch miteinander verbunden sind.

Und der Forscher sieht noch etwas anderes: Wenn er ein Bein des toten Emus so anwinkelt, als würde der Vogel laufen, dann klappt der Fuß nach hinten. Könnte dieser Mechanismus erklären, warum ein so großes Tier nicht nur sehr schnell rennen, sondern auch über Stunden hinweg mühelos stehen kann? Badri-Spröwitz ist neugierig geworden. Er hat jetzt eine These, die er überprüfen kann.

Helfen soll ihm dabei ein mechatronisches Modell der Laufvogelbeine. Im September 2017 beginnen Badri-Spröwitz und sein Doktorand Alborz Aghamaleki Sarvestani damit, BirdBot zu konstruieren. Übersetzen Biomechaniker die Natur in Technik, müssen sie jedoch vereinfachen. Zu komplex sind die Bewegungsabläufe von Tieren, bei denen Skelett, Muskeln, Sehnen und Faszien miteinander interagieren. Alles in Sekundenbruchteilen und millimetergenau. „Der Transfer in die Mechatronik ist schwierig“, sagt Badri-Spröwitz.

Bis heute schaltet sich bei zweibeinigen Robotern in der Standphase meist ein Motor am Kniegelenk ein, der gegen die Schwerkraft arbeitet und das Ge-

wicht der Maschine trägt. Geht der Roboter, schaltet sich der Motor aus, wenn das Bein nach vorne schwingt, und schaltet sich wieder ein, kurz bevor der Fuß erneut den Boden berührt. Ein energieaufwendiges Wechselspiel, das von Sensoren präzise kontrolliert werden muss. Denn damit der Roboter nicht stürzt, muss der Motor zum jeweils richtigen Zeitpunkt arbeiten und pausieren – also innerhalb weniger Millisekunden umschalten. Das macht diese Art von Robotern fehleranfällig. Wie solche Fehler aussehen, das lässt sich auf Youtube bestaunen. Zwischen 2012 und 2015 veranstaltete die Defense Advanced Research Projects Agency (Darpa), eine Behörde des US-Verteidigungsministeriums zur Forschungsförderung,



einen internationalen Robotikwettbewerb, eine Art Weltmeisterschaft der Roboter. Das Preisgeld war hoch, das Renommee der Teilnehmenden ebenso. Die Roboter sollten zum Beispiel Hindernisparcours bewältigen, Treppen steigen oder Auto fahren. Nicht immer klappte das. In Videos, unterlegt mit fröhlichem Klaviergekläpper, ist beispielsweise zu sehen, wie ein Roboter nach einem Ventil greift, danebenlangt und wie ein Betrunkener nach links kippt. Ein anderer Film zeigt einen Roboter, der aus einem Quad steigen will, zu wackeln anfängt und schließlich ungebremst auf den Boden plumpst. Auch das Laufen funktioniert nicht reibungslos: Da ist ein Roboter, der sein linkes Bein nach vorne beugt – nur um gleich darauf zu torkeln und nach hinten umzukippen. All das ist lustig anzusehen und zeigt: Es ist gar nicht so einfach, einen bewegungsfähigen Roboter zu entwickeln.

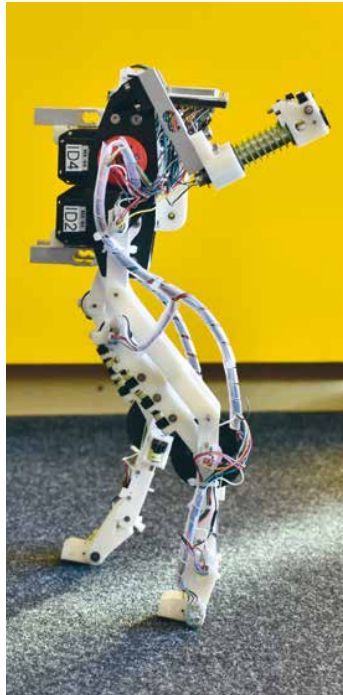


FOTO: WOLFRAM SCHEIBLE FÜR MPG

Beine statt Räder: Mit dem Mechanismus von BirdBot könnten große Roboter etwa auf dem Bau oder in der Landwirtschaft arbeiten.

BirdBot als Schalter, um die Feder im Lauf zu deaktivieren. Durch die Bewegung des Fußes wird die Sehne verlängert und die Spannung aus der Feder genommen. Das funktioniert in etwa wie bei einer Wackelfigur: Diese fällt in sich zusammen, wenn man einen Knopf in ihrem Sockel drückt. Beim Roboter bewirkt ein ähnlicher Mechanismus, dass er in der Schwungphase das Bein hochziehen kann, ohne gegen die Feder zu arbeiten. Das Bein schwingt dann lose. Anstelle der üblichen vier Motoren braucht BirdBot daher nur noch zwei pro Bein – einen am Hüftgelenk und einen zum Beugen des Knies in der Schwungphase. Den Rest macht das Bein von selbst. Ob Laufvögel sich jedoch wirklich nach einem ähnlichen Prinzip fortbewegen, muss die Biologie jetzt noch überprüfen. Denn die Interpretation, dass der zurückklappende Fuß eine Sehne entspannt, die dem Emu und dem Strauß beim Stehen Halt gibt, ist Alexander Badri-Spröwitz zufolge neu. Dem Roboter

70

Der Fuß als Schalter, der das Bein freigibt

Daher verfolgt Badri-Spröwitz einen anderen Ansatz, um einem Roboter in die Gänge zu helfen. Er orientiert sich am Bewegungsapparat des Emus, den er in London untersucht hat. Den Fuß des BirdBot-Roboters entwirft er so, dass dieser über Seilzüge aus künstlichen Sehnen und Rollen mechanisch mit den restlichen Beingenelenken verbunden ist. Wo andere Roboter einen Motor zum Stehen brauchen, genügt BirdBot eine einfache Feder, die das Gewicht trägt. Das spart Energie – aber nur beim Stehen. Beim Laufen, genauer gesagt: beim Anziehen des Beins, würde die steife Feder die Bewegung behindern und sogar mehr Energie kosten. Da der Motor dabei gegen sie anarbeiten müsste, würde er überlastet.

Doch auch dieses Problem hat Badri-Spröwitz gelöst und sich dabei wieder an der Biologie orientiert. Im Stuttgarter Labor erklärt er, wie er die Lösung fand: Im Grunde liefen die meis-

ten Roboter, die Beine haben, wie Menschen. Stark vereinfacht, funktionieren sie so: Wenn wir das Bein anziehen, damit es nicht über den Boden schleift, spannen wir die Muskeln an, die das Bein beugen. Die Muskeln, die es strecken, sind dabei entspannt. Wenn wir das Bein nun nach vorne schwingen, kann es sich frei bewegen. Beim Stehen dagegen sind die Streckmuskeln gespannt. Gehen wir, schalten wir zwischen diesen beiden Modi hin und her. Die Laufvögel, die – anders als der Mensch – ohne Muskelarbeit stehen können, gehen offenbar etwas anders. Der Unterschied, so vermutet Badri-Spröwitz, könnte ihm auch helfen, das Problem mit der blockierenden Feder im Roboter zu lösen. Die entscheidende Frage, die er sich stellt: Warum klappt der Emu im Lauf seine Füße nach hinten?

In der Biologie ist diese Frage bislang nicht abschließend geklärt. Badri-Spröwitz hat jedoch eine Vermutung. Daher konzipiert er den Zeh von



FOTO: DLG MPLIS & UC IRVINE

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Laufvögel können ohne Anstrengung stehen und trotz ihres hohen Gewichts schnell und effizient rennen. Der Grund dafür könnte in der Konstruktion des Sehnenapparats der Beine liegen, wie ein Max-Planck-Team herausgefunden hat.

Nach dem Vorbild von Laufvögeln haben die Forschenden einen energieeffizienten Roboter konstruiert, der sich mit weniger Elektromotoren und mit weniger Steuerungsaufwand fortbewegt als herkömmliche zweibeinige Roboter.

Der Fortbewegungsmechanismus erlaubt es, größere Roboter zu konstruieren, als es bisher möglich ist. Solche Roboter könnten – beispielsweise auf Baustellen oder in der Landwirtschaft – schwere Maschinen ersetzen.

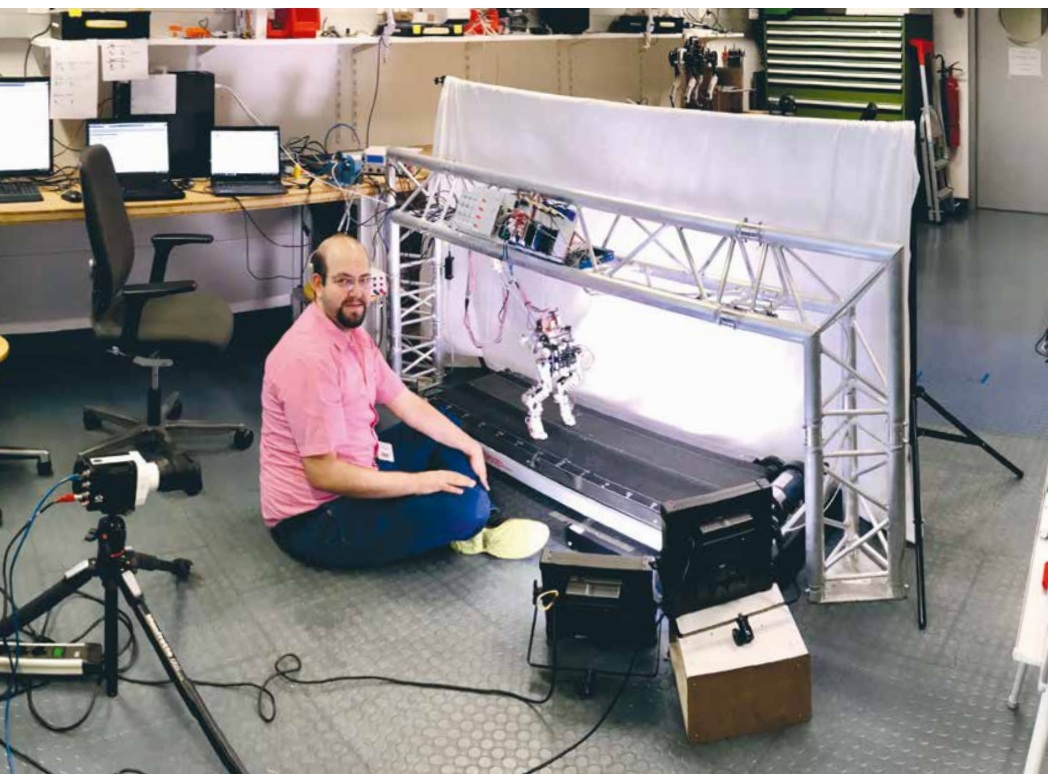
jedenfalls spart der Mechanismus Energie: „Im Vergleich zu anderen Laufrobotern benötigt BirdBot beim Gehen nur ein Viertel der Energie“, erklärt Badri-Spröwitz.

Noch liegt viel Arbeit vor dem Forschungsteam. Badri-Spröwitz will in Zukunft noch mehr biologische Mechanik in BirdBot einbauen – zum Beispiel drei Zehen, die den Roboter stabilisieren. „Schon der T-Rex hatte drei große Zehen, deren Anordnung für das Gehen und Jagen wahrscheinlich effizient und funktional war“, erklärt er. „Die Tiere konnten wahnsinnig groß werden und auch im Morast laufen und springen“, sagt er. Davon ist BirdBot noch weit entfernt. Wie die Zukunft aussehen könnte, zeigen die Forschenden in einem Nebenraum des Stuttgarter Labors. An der Wand hängt ein zwei Meter langes Modell eines BirdBot-Beines, gefertigt aus massivem Holz. Roboter mit so langen Beinen gibt es bislang nicht, weil sie sich nicht mit Elektromotoren

ausstatten lassen, die das entsprechende Gewicht bewegen könnten. „Mit unserer Technik gibt es aber keine Größenbeschränkung für die Roboter“, erklärt Badri-Spröwitz und deutet auf das Modell. Das Feder- und Gelenksystem nimmt einen Großteil der Last von den Motoren.

Am Max-Planck-Institut betreiben Badri-Spröwitz und sein Team Grundlagenforschung zu neuen Fortbewegungsmöglichkeiten von Robotern. Derweil bringen erste Unternehmen bereits zweibeinige Roboter auf den Markt. Da ist zum Beispiel Atlas, ein 1,5 Meter großer und 80 Kilo schwerer Roboter der US-amerikanischen Firma Boston Dynamics. Er kann sich sowohl in Gebäuden als auch im Gelände frei bewegen, kann Kisten vom Boden aufheben oder aus dem Lauf heraus über einen Baumstamm springen. Anders als bei BirdBot funktioniert der Betrieb seiner Mechanik hydraulisch. Diese ermöglicht Atlas menschenähnliche Bewegungen und gibt ihm viel Kraft, eine Überlastung der Motoren ist bei ihm kein Thema. Doch der kräftige Bewegungsapparat macht den Roboter auch gefährlich für Menschen. Außerdem ist seine aufwendige Steuerung ziemlich fehleranfällig. Roboter, die dank des BirdBot-Mechanismus energieeffizient mit Elektromotoren laufen, böten da eine sicherere und zuverlässigere Alternative. Welches System besser geeignet ist, das hängt auch vom Einsatzgebiet ab. Bleibt die Frage, ob wir energieeffiziente Roboter auf Baustellen, als Erntehelfer oder im Weltraum noch erleben werden. Da lacht Alexander Badri-Spröwitz und sagt: „Auf jeden Fall. Das wird gar nicht mehr so lange dauern.“

71



Spielwiese für Techis: Alborz Aghamaleki Sarvestani hat BirdBot in seiner Doktorarbeit zum Laufen gebracht und den Gang in Experimenten auf dem Laufband analysiert. So hat er etwa mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (Bildmitte) Zeitlupenfilme des Roboters gedreht.