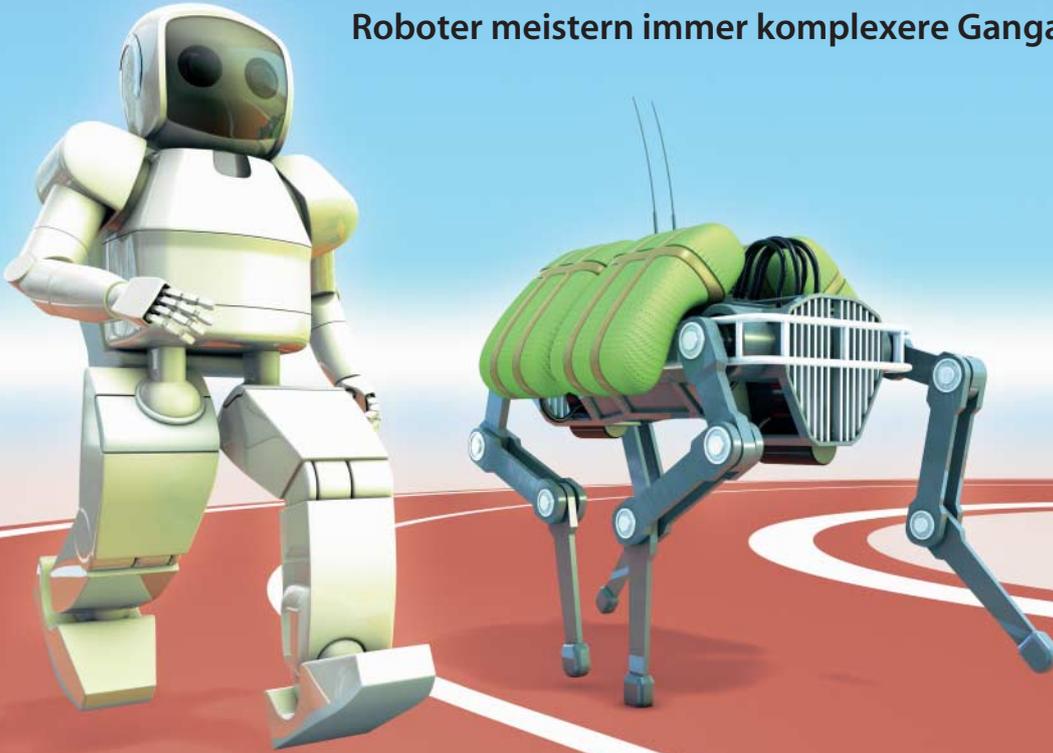


Dr. Hans-Arthur Marsiske

# Laufende Fortschritte

## Roboter meistern immer komplexere Gangarten



**Das Laufen auf Beinen ist immer noch die Fortbewegungsart, die mit unstrukturiertem und unbekanntem Gelände am besten zurechtkommt. Um das Laufverhalten von Robotern zu verbessern, lassen sich Ingenieure mehr und mehr von Bewegungsstudien an Tieren und Menschen inspirieren. Die Orientierung am biologischen Vorbild ermöglicht nicht nur leistungsfähigere Roboter, sondern auch Technologien, die behinderte Menschen beim Laufen unterstützen können.**

**A**m Anfang stand eine Wette: Hat ein galoppierendes Pferd jederzeit mit mindestens einem Bein Bodenkontakt oder nicht? Um die Frage zu klären, stellte der britische Fotograf Eadweard Muybridge entlang der Laufstrecke eines Pferdes 24 Kameras auf, die nacheinander durch Reißleinen elektrisch ausgelöst wurden. Die Fotos zeigten eindeutig, dass das Pferd zeitweise alle Beine in der Luft hatte.

Das war 1878. 130 Jahre später kann man in einem Video auf Youtube sehen, wie der zweibeinige Roboter Asimo recht flott durch einen Raum läuft. Die Kamera wechselt die Perspektive, zeigt in Zeitlupe die Füße des

Roboters. Im entscheidenden Moment friert das Bild für ein paar Sekunden ein: Beide Füße sind in der Luft. Asimo rennt!

Der von Honda entwickelte humanoide Roboter dürfte der erste sein, dem das gelungen ist. Allerdings hätte man ihm das ohne Beweisfoto nicht unbedingt geglaubt. Denn seine Bewegungen sehen nicht aus wie die eines Läufers. Ihnen fehlt die Lockerheit, die Elastizität, mit der ein rennender Mensch sich vom Boden abstößt und wieder landet. Der 1,30 Meter große und 54 Kilogramm schwere Roboter muss sich mächtig anstrengen, um seine Beine vom Boden zu bekommen.

Trotzdem zählt Asimo immer noch zu den beeindruckendsten Robotern, die es derzeit gibt. Die Vielfalt und Natürlichkeit seiner Bewegungen ist bemerkenswert, die Stabilität des Laufverhaltens unübertroffen. Doch beim Rennen scheint er an die Grenzen seines Designs zu stoßen. Viel mehr als die erreichten 6 km/h mag man ihm nicht zutrauen. Um in andere Geschwindigkeitsbereiche vorzustoßen, bräuchte Asimo einen anderen Körper.

### Volle Kontrolle

Technische Details über Hondas Zweibeiner sind zwar kaum bekannt, doch beruht seine Architektur offensichtlich auf dem Prinzip der vollständigen Kontrolle: Die Stellung jedes Gelenks ist in jedem Moment bekannt, selbst in der Schwungphase eines Beins. Dadurch geben die Positionssensoren in den Gelenken eine Höchstgeschwindigkeit vor.

„Ein Roboter kann nicht schneller sein als die Sensorik, Menschen dagegen schon“, sagt Oskar von Stryk, Professor für

Simulation, Systemoptimierung und Robotik an der Technischen Universität Darmstadt. „Je schneller wir laufen, desto weniger sind die Bewegungen geregelt.“ Wenn Menschen dabei trotzdem nicht umfallen, liegt das daran, dass ihre Bewegungen zu einem beachtlichen Teil bereits durch die Mechanik ihres Körperbaus kontrolliert werden. Diese „mechanische Intelligenz“ ist gegenwärtig ein großes Thema in der Robotik. Viele Forschungsgruppen sind auf der Suche nach der „ökologisch ausbalancierten Aufgabenverteilung zwischen Kontrollsystem und mechanischem System“, wie es Akio Ishiguro von der Tohoku University in Sendai, Japan, formuliert.

Wie alle anderen humanoiden Roboter mit reproduzierbarem Laufverhalten nutzt auch Asimo zu seiner Stabilisierung das 1972 von Miomir Vukobratovic formulierte Verfahren des „Zero Moment Point“ (ZMP), das den Punkt berechnet, an dem sich die Beschleunigungskräfte eines sich bewegenden Roboters gegenseitig neutralisieren. Wenn dieser Punkt über einem von der Stand-

fläche der Füße markierten Rahmen liegt, ist der Roboter stabil. ZMP ist ein ausgesprochen einflussreiches Konzept und wird daher auch im gerade erschienenen „Springer Handbook of Robotics“ als „einer der berühmtesten technischen Begriffe, die in der Robotik-Gemeinde entstanden sind“ gewürdigt.

Allerdings erfordert das ZMP-Konzept beim Laufen eben die genaue Kenntnis der Massenverteilung im Roboter und aller Gelenkstellungen. Es ist eine extrem kontrollierte Art der Fortbewegung, die sich in jedem Moment aller Muskeln und Glieder bewusst ist. Kein Mensch oder Tier läuft so.

Den Gegenpol zu den vollständig kontrollierten Systemen bilden die „passive dynamic walkers“. Das sind zweibeinige Laufmaschinen, die auf einer schiefen Ebene ohne weitere Energiezufuhr oder elektronische Kontrolle einen stabilen, erstaunlich natürlich wirkenden Gang realisieren. Er kommt zustande durch ein sorgfältig austariertes Wechselspiel zwischen der Zunahme der Energie durch das Gefälle und dem Energieverlust beim Aufsetzen eines Beins.

Inwieweit das Design dieser Passivläufer für die Roboterentwicklung neue Perspektiven aufzeigen kann, ist umstritten. Auf jeden Fall aber bilden sie eine Orientierungsmarke dafür, was eine intelligente Mechanik allein leisten kann. Deren detaillierte Erforschung beschäftigt derzeit zahlreiche Forschungsgruppen.

So haben etwa Emanuel Andradra und Hartmut Witte von der Technischen Universität Ilmenau kürzlich auf der Konferenz AMAM (Adaptive Motion of Animals and Machines) in Cleveland eine Studie vorgestellt, die die Rolle des Rumpfes beim Laufen untersucht. Durch Beobachtung von Versuchspersonen und mit Hilfe von Computersimulationen kamen sie zu dem Ergebnis, das die kompensatorischen Bewegungen, die Oberkörper und Kopf stabilisieren, durch „mechanische Intelligenz“ statt durch neuronale Kontrolle hervergerufen werden.

## Elastizität und Effizienz

Ein ausgeklügeltes Design kann aber nicht nur die Kontrolle des Laufverhaltens unterstützen, sondern auch zu einem sehr

energieeffizienten Laufen verhelfen. „Die Elastizität des Bewegungsapparats ist gegenwärtig ein großes Thema in der Laufrobotik“, bestätigt von Stryk, der in seinen Teams mit zwei- und vierbeinigen Robotern regelmäßig an RoboCup-Turnieren teilnimmt. „Die Diskussion dreht sich darum, ob sich diese Elastizität in den existierenden Designs durch Verbesserungen bei Antrieben und Regelung realisieren lässt oder ob Veränderungen an der Mechanik erforderlich sind.“ Er gibt zu bedenken, dass ohne mechanische Elastizität keine Speicherung von Energie möglich sei. Die Energieeffizienz natürlicher Systeme könne aber auf andere Weise nicht erreicht werden.

Tatsächlich ist es vorstellbar, dass Asimo durch geschicktes Ansteuern der Gelenkmotoren stärker federnde Bewegungen erzeugen könnte. Er müsste sich dazu aber sehr anstrengen, also zusätzliche Energie investieren, während der große Vorteil der mechanischen Feder darin besteht, kinetische Energie beim Auftreffen auf den Boden zurückzugewinnen und für den nächsten Schritt zu nutzen.

Eine von dem Biologen Richard L. Marsh geleitete Studie an der Northeastern University in Boston hat die Verteilung des Energieaufwands zwischen dem stemmenden und dem schwingenden Bein beim zweibeinigen Gehen genau untersucht. Sie ist damit zugleich ein anschauliches Beispiel dafür, wie sich das Methodenspektrum für Bewegungsstudien seit Muybridge erweitert hat. Die Forscher wählten Perlhühner als Versuchstiere und injizierten ihnen farbige Mikrokugeln in die Adern, um zu beobachten, wie sich das Blut beim Gehen auf 24 verschiedene Beinmuskeln verteilt. Zusätzlich registrierten Elektroden bei 18 Muskeln die elektrische Aktivität. Das Ergebnis: Die Bewegung des Schwungbeins verbraucht 26 Prozent des Blutflusses, 74 Prozent gehen ins Stemmbein.

Nun gelten Vögel generell nicht als besonders elegante Vertreter des zweibeinigen Gangs. Aber schon diese Studie macht deutlich, dass sich die Schwerkraft beim Laufen deutlich besser ausnutzen lässt, als es bei Asimo der Fall ist.

Um diese Energieeffizienz auf Roboter zu übertragen, versu-

**80 Millisekunden ohne Bodenkontakt: Wenn Hondas Asimo mit 6 km/h rennt, kommt das Steuerungskonzept an seine Grenzen.**



Bild: Honda

chen mehrere Forschergruppen, das Zusammenspiel von Muskeln und Knochen nachzubilden – mit Computersimulationen, aber auch auf realen Robotern. So präsentierten mehrere japanische Forschergruppen bei der AMAM Roboter, bei denen das menschliche Muskelsystem durch mit Luftdruck betriebenen pneumatischen Aktuatoren nachgebildet war. Ein einbeiniger Roboter von der Osaka University kann mehrere Sprünge hintereinander ausführen und wird dabei im Wesentlichen durch die ausgeklügelte Mechanik stabilisiert. Ein 125 Zentimeter hoher Zweibeiner von der University of Tokyo schafft Sprünge von 50

Zentimeter Höhe und kann einen Sturz aus einem Meter Höhe weich abfedern.

Ob pneumatische Muskeln tatsächlich die heutigen Servomotoren und Getriebe ablösen können, wird von Experten wie von Stryk zwar bezweifelt. Auf jeden Fall aber unterstreichen die Experimente die Bedeutung des Körperbaus für energieeffizientes, stabiles Laufen und treiben damit den Paradigmenwechsel bei der Roboterkonstruktion voran.

Dieser Paradigmenwechsel wird derzeit vornehmlich anhand des zweibeinigen Gehens erforscht, ist aber nicht nur für humanoide Roboter interessant.

**Robo-Superstar: Unter den Vierbeinern seiner Größenklasse ist BigDog von Boston Dynamics derzeit der unangefochtene Tabellenführer.**



Bild: Boston Dynamics



Bild: DFKI

**Einsatz im Krater: Am DFKI-Labor in Bremen wird der sechs-beinige Roboter Scarabaeus auf seinen Einsatz im Weltraum vorbereitet. Jedes seiner Beine ist mit einem Manipulator ausgestattet, um an schwer zugänglichen Stellen auf dem Mond Proben entnehmen zu können.**

Auch Mehrbeiner können von mechanischer Intelligenz oder „morphological computing“, wie es Rolf Pfeifer von der Universität Zürich formuliert hat, profitieren. Allerdings steht bei ihnen gegenwärtig eher die Nachahmung der neuronalen Kontrolle des Laufverhaltens im Vordergrund.

### Reflexstarke Vierbeiner

Das Forschungsteam um Hiroshi Kimura von der University of Electro-Communications in Tokio etwa verbesserte die Anpassungsfähigkeit seines Roboters

Tekken mit Hilfe eines nach und nach erweiterten Repertoires an Reflexen, die dem Vierbeiner angemessene Reaktionen auf unerwartete Hindernisse ermöglichen. Dazu zählt zum Beispiel ein Ausfallschritt, wenn der Roboter ein seitliches Gefälle wahrnimmt, oder eine Ausweichbewegung bei der Kollision eines Beines mit einem Hindernis. In so einem Fall überlagern die Reflexe die Signale des zentralen Mustergenerators, der ansonsten auf flachem, unproblematischem Gelände die Bewegungen der Beine rhythmisch aufeinander abstimmt.



Bild: A. Herzog, Biologically Inspired Robotics Group, EPFL

**Großer Sprung für die Evolution: ... aber nur eine kleine Frequenzveränderung des zentralen Mustergenerators bei diesem Salamander-Roboter, der an der Ecole Polytechnique in Lausanne den Übergang des Lebens vom Wasser aufs Land nachvollzieht.**

Das Prinzip der zentralen Mustergeneratoren haben sich die Roboterkonstrukteure von der Natur abgeschaut. Motoneuronen im Rückenmark erzeugen bei Wirbeltieren die rhythmischen Muster, die die Bewegungen der Beine beim Laufen aufeinander abstimmen. Bei Insekten sind diese Neuronen in den Brustganglien lokalisiert. Die Mustergenerierung erfolgt zunächst ohne sensorischen Input, reagiert aber auf Signale der Sinnesorgane. Die Registrierung des Bodenkontaktes durch die Füße etwa hilft, die Bewegungsphasen immer wieder neu zu justieren. Gravierende Abweichungen wie Kollisionen oder Ausrutscher wiederum führen zu Eingriffen höherer kognitiver Ebenen.

Ein Ziel von Kimuras Forschungen ist die Entwicklung eines allgemeinen Kontrollsystems, das es vierbeinigen Robotern erlaubt, die für die jeweilige Umgebung am besten geeignete Gangart zu wählen. Vierbeinigen Lebewesen stehen mit Schritt, Trab oder Galopp verschiedene Gangarten zur Verfügung, die für bestimmte Geschwindigkeitsbereiche jeweils am effizientesten sind. „Das ist ähnlich wie bei einer Gangschaltung“, sagt Felix Grimmering vom Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) in Bremen. „Wie die Übergänge zwischen den verschiedenen Gangarten geregelt werden, ist aber noch nicht geklärt.“

Grimmering gehörte, bevor er zum DFKI wechselte, zum Team des derzeitigen Superstars unter den vierbeinigen Robotern: BigDog. Ein kürzlich veröffentlichtes Video der Laufmaschine von der Größe eines kleinen Esels sorgte in der Robotik-Gemeinde für einiges Aufsehen. Dort ist zu sehen, wie der von einem Verbrennungsmotor angetriebene Roboter durch den Wald läuft, steile Hänge hinaufsteigt und sich auch von Geröllfeldern nicht aufhalten lässt. Einen kräftigen Tritt in die Seite pendelt BigDog durch einen raschen Ausfallschritt aus, er stapft durch tiefen Schnee und schafft es selbst auf Glatteis, sich auf den Beinen zu halten.

Der Vierbeiner wird im Rahmen eines Projekts der US-Militärforschungsbehörde Darpa (Defense Advanced Research Projects Agency) von der Firma

Boston Dynamics entwickelt. Deren Gründer Marc Raibert hatte bereits in den frühen achtziger Jahren am LegLab des Massachusetts Institute of Technology (MIT) mit einem einbeinigen, hüpfenden Roboter experimentiert und damit der Forschung wichtige Impulse gegeben. Während diese frühen Hüpfer und Läufer aber nie das Labor verließen, soll BigDog jetzt die Ära der geländetauglichen Laufmaschinen einläuten.

Dafür wurden in dem Roboter „einige der besten Komponenten verbaut, die überhaupt erhältlich sind“, sagt Grimmering, der insbesondere für die Hydraulik verantwortlich war, die die Beine antreibt. Die Ventile, so Grimmering, die in weniger als sechs Millisekunden auf Steuerbefehle reagieren können, kämen sonst in Kampfjets oder Raketen zum Einsatz. Noch schneller ist die Sensorik, die die wichtigsten Parameter wie Gleichgewicht, Beschleunigung und Gelenkpositionen mit einer Frequenz von 500 Hertz überprüft, also alle zwei Millisekunden.

Inspiziert von biologischen Vorbildern und ähnlich dem Tekken-Roboter aus Kimuras Labor wird BigDog von einem zentralen Mustergenerator gesteuert, der die Bewegungen der Beine koordiniert. Dabei strebt der Roboter an, die Last gleichmäßig auf die Beine zu verteilen. Bei Störungen, etwa dem Stolpern oder Rutschen eines Beines, wird der Mustergenerator durch Reflexe überlagert. In der Regel reagiert dann ein gerade in der Schwungphase befindliches Bein und bekommt etwa den Befehl, einen ausgleichenden Schritt durchzuführen.

Bisher hat BigDog beim Laufen, Traben und Springen Geschwindigkeiten von über 6 km/h erzielt. Er ist eine 35 Grad steile Böschung hinaufgeklettert, ist knapp zehn Kilometer am Stück gelaufen und hat auf flachem Untergrund eine Last von über 150 Kilogramm getragen. Beindruckend ist auch ein im Video gezeigter Sprung über eine Distanz von etwa einem Meter im Labor.

Es ist geplant, BigDog vornehmlich als Lastenträger einzusetzen. Der Roboter wird daher derzeit von einem Operator mit Sichtkontakt ferngesteuert. Nach und nach soll er aber mit immer mehr Intelligenz ausgestattet

werden, sodass er autonom einem Menschen folgen und dabei auch Hindernissen ausweichen kann.

## Sechsbeiner im Weltall

Angesichts der spektakulären Leistungen von zwei- und vierbeinigen Robotern können Laufmaschinen mit sechs und mehr Beinen leicht etwas blass und unbeholfen wirken. Für Erkundungsmissionen, etwa in Erdbebengebieten oder auf anderen Planeten, bleiben sie aber auf absehbare Zeit die erste Wahl. Insbesondere beim Einsatz im Weltraum sind die erhöhte Stabilität und Redundanz wichtige Kriterien, die aber gegen das ebenfalls erhöhte Gewicht und den höheren Energieaufwand abgewogen werden müssen.

Der Roboter Scarabaeus, der gegenwärtig am DFKI für einen Einsatz auf dem Mond vorbereitet wird, dürfte mit seinen sechs Beinen daher optimal ausgestattet sein. Einen konventionellen radgetriebenen Rover soll er allerdings keinesfalls ersetzen, sondern ihn ergänzen. „Ein radgetriebener Roboter bringt Scarabaeus an den Einsatzort, etwa an den Rand eines Kraters“, erläutert DFKI-Mitarbeiter Sebastian Bartsch. „Dort steigt der Roboter dann hinab, nimmt Proben und bringt sie zum Rover zurück.“

Für die Probenentnahme sind die Beine von Scarabaeus mit Greifvorrichtungen ausgestattet. Je nachdem, welches Bein am günstigsten steht, kann es als Manipulator eingesetzt werden, während die übrigen Beine für einen stabilen Stand sorgen. Dafür wird der zentrale Mustergenerator, der auch beim Sechsbeiner das Laufverhalten steuert, von einer höheren Softwareebene überlagert.

## Einblicke in die Evolution

In der Gesamtschau erscheinen die vielen verschiedenen Ansätze zum Design und zur Steuerung mehrbeiniger Roboter wie eine Evolution des maschinellen Laufens, die gerade eine große Dynamik entfaltet. Womöglich kann deren genaue Beobachtung auch neue Einblicke in die natürliche Evolution der Gangarten ermöglichen.

So gelang es einem von Auke Ijspeert an der Ecole Polytech-



Bild: Otto Bock

nique Fédérale de Lausanne geleiteten Forschungsteam, einen Salamander-Roboter zwischen Lauf- und Schwimmbewegungen wechseln zu lassen, indem lediglich die Frequenzen der zentralen Mustergeneratoren verändert wurden. Ijspeert hofft, mit Hilfe dieser Experimente den Übergang der Wirbeltiere vom Wasser aufs Land und die damit verbundenen Veränderungen des Nervensystems sowie generell den Wechsel zwischen verschiedenen Gangarten besser zu verstehen.

Tatsächlich können minimale Eingriffe ins Nervensystem für gravierende Veränderungen sorgen. Forscher des Max-Planck-Instituts für Experimentelle Medizin in Göttingen konnten Mäuse wie Kaninchen hoppeln lassen, indem sie die Bildung eines Proteins, des alpha-2-Chimaerins, unterbanden. Dieses Protein verhindert in der frühen Entwicklung des Nervensystems, dass Nervenzellen von einer Seite des Rückenmarks in die gegenüberliegende einwachsen. Auf diese Weise werden die Nervenzellen so miteinander verschaltet, dass eine paarweise Bewegung von Vorder- und Hinterbeinen vermieden wird. Bei Mäusen, die aufgrund einer gezielten genetischen Manipulation kein alpha-2-Chimaerin erzeugen können, kommt es dagegen zu einer Fehlverschaltung, die eine untypische Gangart hervorbringt.

War es womöglich eine ähnliche Kleinigkeit, die unsere Vor-



Bild: Science

**Kniedynamo: Eine intelligente Ausnutzung der Laufenergie könnte in Zukunft auch die Energieversorgung von Prothesen wie dem von der Firma Otto Bock angebotenen mikroprozessor-gesteuerten C-Leg (links) vereinfachen, dessen 12-V-Lithium-Ionen-Akku bisher noch extern aufgeladen werden muss.**

fahren einst dazu gebracht hat, sich auf zwei Beine zu erheben? Die Gründe für die Ausbildung des aufrechten Gangs beim Menschen sind unter Anthropologen nach wie vor umstritten. Aber vielleicht bringen Ingenieure und Informatiker, die ihren Robotern mit viel Mühe das Laufen auf zwei Beinen beibringen, demnächst neue Aspekte in die Debatte. Naomichi Oghihara und sein Team an der Kyoto University, die anhand eines digitalen Modells des japanischen Affen dessen Wechsel zwischen vierbeinigem und zweibeinigem Gang untersuchen, sind jedenfalls überzeugt, dass sich hier ein „interessantes Forschungsgebiet für die physische Anthropologie eröffnet“.

## Gehhilfen

All diese Forschungen werden in den kommenden Jahren auch mehr und mehr denjenigen helfen können, die aufgrund von Krankheiten, Verletzungen oder ihres Alters Probleme mit dem Laufen haben. So hat Atsuo Takanishi mit seinem Team an der Waseda University in Tokio bereits den Prototyp eines Laufstuhls entwickelt, der eine bis zu 80 Kilogramm schwere Person auf Beinen statt auf Rädern transportieren kann. Beim Roboterturnier Eurobot in Heidelberg zeigte Takanishi kürzlich Videoaufnahmen von einem Test des WL-(Waseda Leg-)16 genannten Geräts in Los Angeles. 170 Personen, so Takanishi, habe WL-16 getragen, ohne einmal zu versagen.

Wirklich entspannt sahen die WL-16-Nutzer dabei allerdings nicht aus. Offenbar ist der Gang der künstlichen Beine noch nicht geschmeidig genug, um sich ihnen bedenkenlos anvertrauen zu können. Auch mag das von Stewart-Plattformen inspirierte Design des Laufstuhls psychologische Abwehrreaktionen hervorrufen. Die parallelen, teleskopartigen Aktuatoren mögen zwar die derzeit robusteste Technologie sein, um schwere Lasten zu balancieren. Sie wecken aber eben auch Erinnerungen an Flugsimulatoren, die ihre Nutzer eher herumwirbeln, statt sie sanft über Hindernisse zu tragen.

Direkt mit dem Körper verbundene Prothesen dürften auf Dauer die bessere Lösung sein, um behinderten Menschen wieder zu mehr Beweglichkeit zu verhelfen. Für die Versorgung solcher Prothesen mit dem nötigen Strom liefern auch 130 Jahre nach Muybridges legendären Pferdefotos immer noch Bewegungsstudien wertvolle Anregungen. So hat Max Donelan von der kanadischen Simon Fraser University zusammen mit US-Kollegen einen Generator entwickelt, der am Knie getragen wird. Er unterstützt das Schwungbein beim Abbremsen kurz vorm Aufsetzen und erzeugt dabei knapp fünf Watt elektrischen Strom. Die Energieversorgung von Prothesen oder Implantaten könnte auf diese Weise dauerhaft gewährleistet werden, schreiben die Wissenschaftler, zumal es bei dem Generator noch erhebliches Optimierungspotenzial gebe.

(anm) **ct**