

🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

# Rollen mit Ballbots

Roboter, die sich nicht auf zwei Beinen, sondern auf einer Kugel fortbewegen, könnten hinreichend mobil sein, um einmal auch Menschen im Alltag zu unterstützen.

Von Ralph Hollis

**U**nwiderstehlich scheint für viele der Traum vom intelligenten, mobilen Roboter, der Menschen im Alltag zu Hause, im Büro oder im Krankenhaus zur Hand geht. Obwohl dies ein uraltes Lieblingsthema von Sciencefiction-Autoren und Robotik-Forschern ist, scheint das Ziel immer noch in ferner Zukunft zu liegen.

Ingenieure haben fundamentale Probleme damit zu erkennen, wie Roboter ihre Welt wahrnehmen und abbilden, welche Schlussfolgerungen sie dabei nach welchen Regeln ziehen, wie sie mit Gegenständen umgehen und wie sie sich fortbewegen. Immerhin wurden inzwi-

schon Roboter konstruiert, die sich durchaus nützlich machen können. 2002 setzte eine Forschergruppe am Eingang des Gebäudes in Edmonton (Kanada), in dem gerade die Amerikanische Gesellschaft für Künstliche Intelligenz tagte, einen Roboter ab.

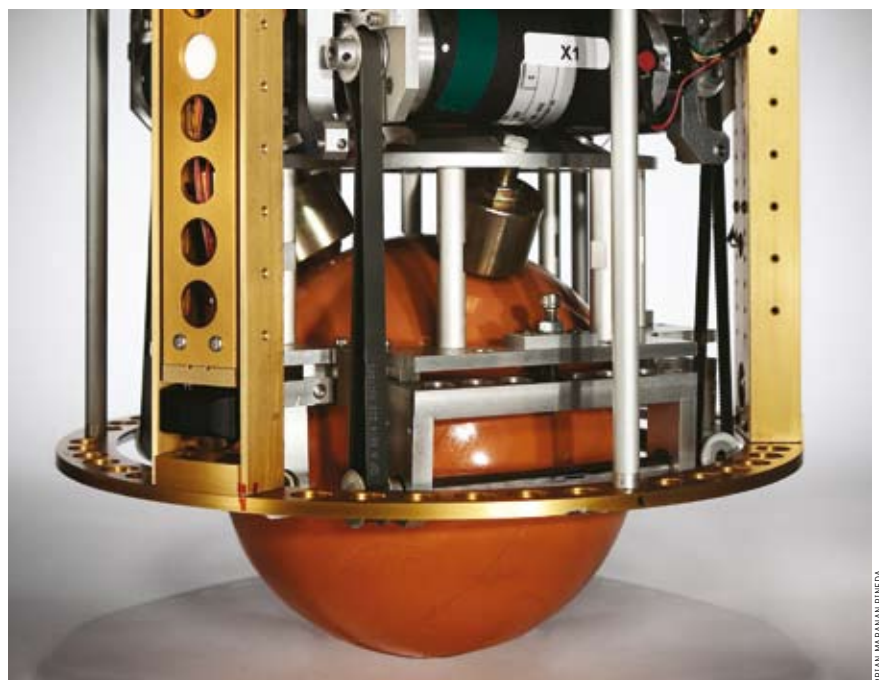
Züig fand die gewitzte Maschine den Weg zum Anmeldeschalter, schrieb sich für die Konferenz ein, ließ sich einen Vortragsraum zuweisen, begab sich zu dieser Veranstaltung und hielt zum vereinbarten Zeitpunkt einen kleinen Vortrag über sich selbst. Andere Roboter haben zwischenzeitlich effektiv als Museumsführer gedient, andere leisten nützliche Dienste als Krankenpflegehilfen. Computerwissenschaftler und Ingenieure haben mobile Systeme mit Armen

und Händen zur Handhabung von Gegenständen ausgerüstet. All diese Versuchsapparate bewegen sich auf drei oder vier Rädern. Konstrukteure nennen diese Konfigurationen »statisch stabil«, weil sie den Roboter auch in Ruhestellung aufrecht halten. Roboter, die groß genug sind, um sich in menschlicher Umgebung zu bewegen, haben jedoch einen hoch gelegenen Schwerpunkt und dür-

▶ Einen neuen Typ mobiler Roboter könnte der hier gezeigte Ballbot darstellen: Platz sparend, beweglich und trotz seiner Fußkugel immer »dynamisch stabil«. Rechts: die Studenten Eric Schearer (links) und Anish Mampetta mit dem Prototyp; unten: der Roboterfuß im Detail.

## In Kürze

- ▶ Ballbots sind **dünne, große Roboter**, die sich auf einer Rollkugel rasch in beliebige Richtungen fortbewegen können. Sie könnten in beengten Räumen nützlich sein, um etwa hilfsbedürftige Menschen zu unterstützen.
- ▶ Um mit **Menschen im Alltag** umgehen zu können, werden intelligente, mobile Roboter aufrecht stehen und sich bewegen, ohne dauernd anzuecken.
- ▶ Die meisten derzeitigen Robotertypen haben **Füße oder mehrere Räder**, weshalb sie breiter gebaut sind und sich nur schwerfällig bewegen können.



BRIAN WARANAN PINEIDA



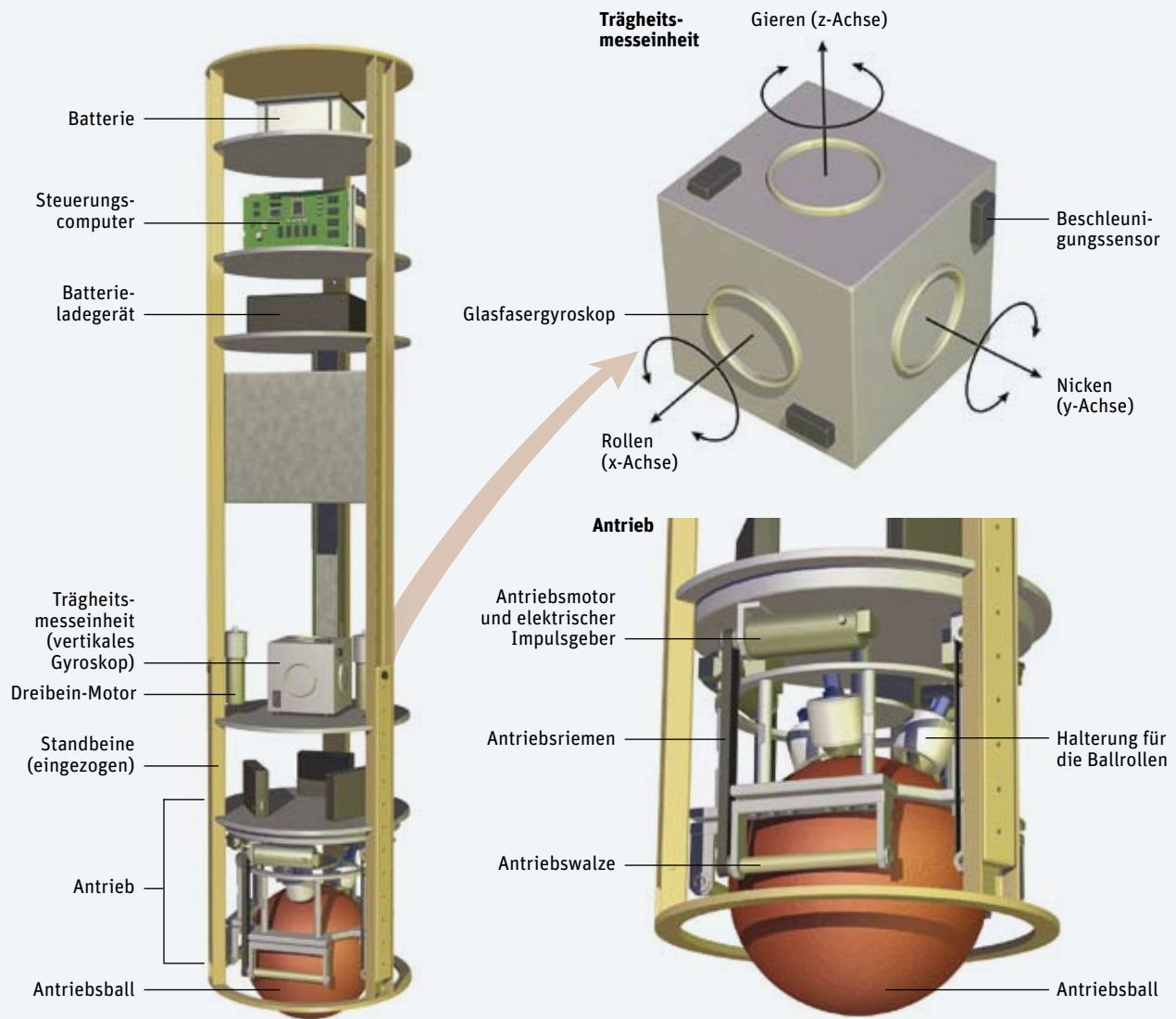
CARNEGIE MELLON UNIVERSITY

## DER BAUPLAN EINES BALLBOT

**IN GEWISSE WEISE** ähnelt der Ballbot (links) einem Kugelschreiber von rund 1,50 Meter Größe. Die Glasfasergyroskope und Beschleunigungssensoren (rechts oben), die in rechten Winkeln zueinander montiert sind, um die Bewegung in den Gier-, Roll- und Nickachsen zu bestimmen, erzeugen die Daten zur laufenden Ausrichtung an der Vertikalen. Diesen Input benötigt der Computer, um das Gleichgewicht zu halten (siehe Kasten auf der

rechten Seite). Der Antrieb für den Ball (rechts unten) arbeitet ähnlich wie eine umgedrehte Computermaus. Motoren bewegen Antriebsrollen, die den Ball drehen, während Leitrollen und optische Impulsgeber die zurückgelegte Strecke des Ballbots vermessen.

Um aufrecht stehen zu bleiben, wenn der Antrieb abgeschaltet wird, fährt die Maschine drei Beine aus.



GEORGE RETSECK

▷ fen, um nicht umzukippen, nur langsam beschleunigen oder bremsen. Deshalb tendieren statisch stabile Roboter zu breiten Körpern auf breitem Radstand; solche plumpen Formen sind aber für ihre Fortbewegung durch Türen und um Möbel oder Menschen herum eher hinderlich.

Vor einigen Jahren beschloss ich daher, das Problem mit den breiten Radständen einfach zu umgehen. Ich kon-

struierte einen großen, schlanken und beweglichen Roboter, der auf einem einzigen großen, kugelförmigen Rad steht und von diesem auch angetrieben wird. Eine so simple Maschine mit ihrem hoch liegenden Schwerpunkt wäre in der Lage, sich schnell in jede Richtung zu bewegen. Das System würde aktiv balancieren und wäre so »dynamisch stabil«. Es kann sich nur so lange aufrecht halten, wie es seine Körperhaltung korrigiert. Mir fiel auf,

dass dieses Design eine bis dahin noch nicht untersuchte Klasse von rollenden Robotern begründen könnte. Mangels einer besseren Bezeichnung nannte ich sie »Ballbots«.

Meine Studenten und ich entwickeln die Automaten jetzt seit 2005. Seitdem haben wir ihre Stabilität und Eignung für den Einsatz in einer menschlichen Alltagsumgebung untersucht. Viele Besucher unseres Labors fanden die geschick-

te Art dieser Einheiten, zu balancieren und auf einer Kugel umherzufahren, ziemlich bemerkenswert.

Menschen steuern ihre aufrechte Haltung mit Hilfe des Gleichgewichtsorgans im Innenohr. Dessen Daten werden mit dem Input aus anderen Sinneskanälen wie etwa dem Sehen kombiniert, um die Muskulatur in Beinen und Füßen so zu steuern, dass wir aufrecht stehen ohne umzufallen. Ein Ballbot regelt sein Gleichgewicht durchaus ähnlich:

- ▶ Er braucht ein Ziel: etwa auf einer Stelle zu verharren oder sich auf gerader Linie von A nach B zu bewegen.
- ▶ Für sein Gleichgewicht muss er laufend die Orientierung seines Körpers relativ zur Senkrechten kennen.
- ▶ Er muss in der Lage sein, den Ball in jede beliebige Richtung zu drehen und den zurückgelegten Weg zu vermessen.
- ▶ Um sein Ziel zu verfolgen, benötigt der Roboter ein Steuerprogramm, mit dem er alle Sensordaten auswertet und daraus Befehle für die Rotation des Balls ableitet.

Das »Problem der Vertikalen« hat sich als besonders schwieriges Unterfangen herausgestellt (siehe Kasten rechts). Unsere Lösung basiert auf vielen technischen Fortschritten der jüngeren Zeit, ob bei Computern, Glasfasertechnik oder Mikromechanik. Damit lassen sich heute kostengünstige Geräte produzieren, welche die Funktion traditioneller drehender Gyroskope übernehmen.

### AUFRECHT DANK SAGNAC-EFFEKT

Wir benutzen ein System aus drei Glasfasergyroskopen. Diese sind senkrecht zueinander in einem Behälter untergebracht, der fest mit dem Ballbot verbunden ist (siehe Kasten links). Die Gyroskope besitzen keine rotierenden Massen wie ein traditioneller Kreiselkompass, sondern stattdessen eine Lichtquelle, einen Detektor und eine Glasfaserspule. Lichtwellen laufen ständig in entgegengesetzter Richtung durch die Spule und interferieren am Detektor. Im Betrieb rotiert der Körper des Ballbots mit seinen drei Winkelsensoren in alle Richtungen.

Die Lichtwellen in den Glasfasern laufen immer mit konstanter Lichtgeschwindigkeit durch die Gyroskope – unabhängig von der äußeren Bewegung. Entsprechend entsteht in den Sensoren ein kleiner Gang-Unterschied zwischen den Wellen, die sich im Uhrzeigersinn bewegen, relativ zu denjenigen, die ▷

## WO IST OBEN?

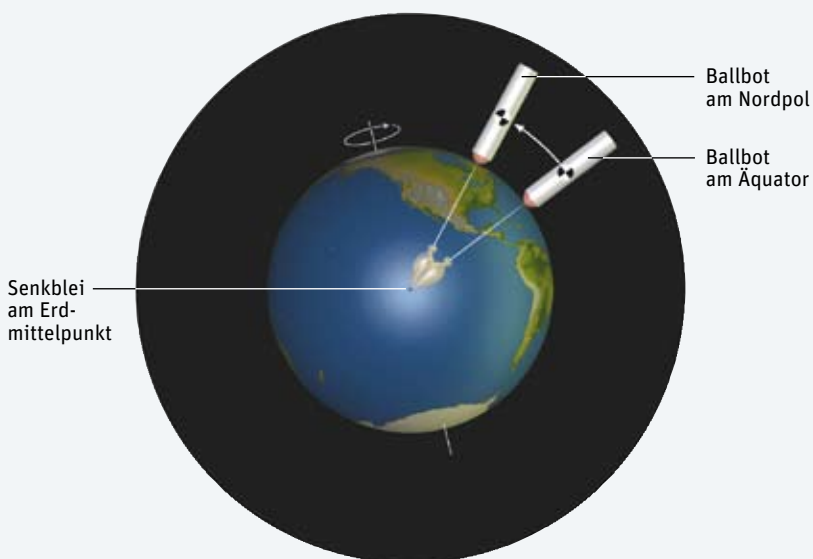
**HERAUSZUFINDEN, WAS OBEN ODER UNTEN IST** (was die frühen Flieger als das Problem der Vertikalen bezeichneten), hat sich als schwierig erwiesen. Ein Lot am Seil zeigt die Vertikale an. Aber ein Ballbot, der mit einem solchen Pendel ausgerüstet wäre, würde dadurch verwirrt, dass der Pendelkörper (etwa ein Senkblei) meistens vor- und zurückschwingt.

Alternativ könnte sich ein Ballbot auf seine Gyroskope stützen. Die Drehscheibe mit den drei Gyroskopen wäre kardanisches, also frei und drehbar aufgehängt, sodass ihre Achse in eine beliebige Richtung zeigen kann. Bevor der Roboter losrollt, könnten Schwungräder mit einem Motor in schnelle Drehung versetzt und die Achse in die Senkrechte gebracht werden. Die Trägheit der Gyroskope ließe die Achse unabhängig von der ausgeführten Bewegung immer in dieselbe Richtung zeigen. Verbindet man die Aufhängung mit Winkelmessern, könnte man die Vorwärts-rückwärts-Neigung (Gieren oder Nicken) sowie die Rechts-links-Neigung (Rollen oder Schlingern) ausmessen. Dieses Verfahren birgt jedoch Probleme. Die Achse der Gyroskope würde in ihrer Richtung verharren, während die Erde rotiert, und dadurch von der Vertikalen abweichen.

Als Ausweg könnte man die Gyroskope mit einem kurzen, mechanischen Pendel kombinieren. Während sich der Ballbot bewegt, würde die Richtung des Pendels über die Zeit gemittelt werden, um einen zuverlässigen Wert für die Senkrechte zu erhalten. (Laterale Beschleunigungen würden sich herausmitteln, sodass die Schwerkraft dominiert.) Das Ergebnis könnte verwendet werden, um Drehmomente auf die Gyroskope auszuüben, um es senkrecht zu halten.

**DER DEUTSCHE INGENIEUR MAXIMILIAN SCHULER** hat diese Lösung 1923 zuerst entdeckt. Dabei stellte er sich ein Pendel vor, das bis zum Mittelpunkt der Erde reicht (siehe Grafik). Ein so langes Pendel würde immer nach unten zeigen, unabhängig von der Bewegung, und mit einer Periode von 84,4 Minuten schwingen. Diese so genannte Schuler-Periode entspräche der Umlaufperiode eines Satelliten, der die Erde genau auf Meereshöhe umkreist. Dies ist die minimale Umlaufperiode, die ein frei um die Erde fallender Körper theoretisch haben könnte. Schuler zeigte nun, wie kleine Drehmomente, die auf ein Gyroskop wirken, die Periode eines kurzen Pendels auf 84,4 Minuten verlängern würden, was tatsächlich das Problem löst, indem es das Pendel immer senkrecht zur Erdoberfläche ausrichtet. Unser Ballbot verwendet Glasfasergyroskope und mikroelektromechanische Beschleunigungssensoren. Sie simulieren die Funktion eines Gyroskops, das mit einem Pendel kombiniert ist. Es stellt ein »vertikales« Gyroskop dar, das immer erkennt, wo »oben« ist. Daran orientiert sich der Ballbot, um sein Gleichgewicht zu halten.

R.H.



▷ entgegengesetzt dazu umlaufen. In jedem Fall verschiebt diese Differenz im Detektor das Interferenzmuster. Das erzeugt ein Messsignal proportional zur Winkelgeschwindigkeit. Der Effekt wurde vom französischen Physiker Georges Sagnac bereits 1913 entdeckt. Ein kleiner Computer summiert die Winkelgeschwindigkeiten für die drei Raumrichtungen auf und bestimmt damit die Neigung in Vorwärts-rückwärts-Richtung, das Kippen in Rechts-links-Richtung sowie die Drehung um die vertikale Achse des Roboterkörpers.

Um die korrekte vertikale Orientierung zu bestimmen, müssen alle Gyroskope die Erdrotation berücksichtigen, zudem noch einige kleinere Effekte, die sonst mit der Zeit zu Fehlern und Abweichungen in Form einer Drift führen würden. Unser System enthält drei Beschleunigungssensoren, die senkrecht zueinander und parallel zu den Gyroskopen montiert sind. Während der Ballbot umherrollt, registrieren diese Sensoren stets die momentane Beschleunigung. Ein Computer errechnet daraus Gesamt-

wert und Richtung der Beschleunigung und mittelt sie über die Zeit. (Die Beschleunigungsdaten können nicht direkt für das Balancieren verwendet werden.) Mit diesem Input ermittelt das System einen zuverlässigen Langzeitindikator für die Richtung der Schwerkraft, der im Glasfasergyroskop zur Korrektur der Driftbewegung dient.

### ZIRKUSCLOWN AUF DER KUGEL

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, einen Ball mit Motoren in verschiedene Richtungen zu bewegen. Wir suchten nach einem möglichst einfachen Antrieb. Verschiebt man mit der Hand eine mechanische Computermaus, verdreht die mit Gummi überzogene Kugel auf der Unterseite zwei senkrecht zueinander gelagerte Räder. Die Drehung der Rädchen wird gemessen und versorgt den Computer mit dem Input, um den Zeiger entsprechend über den Bildschirm zu bewegen.

Beim Ballbot geschieht genau das Umgekehrte. Der Ballbotcomputer dirigiert zwei Motoren; diese treiben die Räder an,

die den Ball rotieren lassen, was wiederum den Roboter in jede gewünschte Richtung bewegt. Im Wesentlichen entspricht das einem »inversen« Mausballantrieb. Derzeit treiben die Motoren den Ball in der Kipprichtung sowie nach links oder rechts. Ein dritter Motor soll einmal den Körper auch um die vertikale Achse drehen. Damit könnte sich der Roboter dann in alle Richtungen drehen.

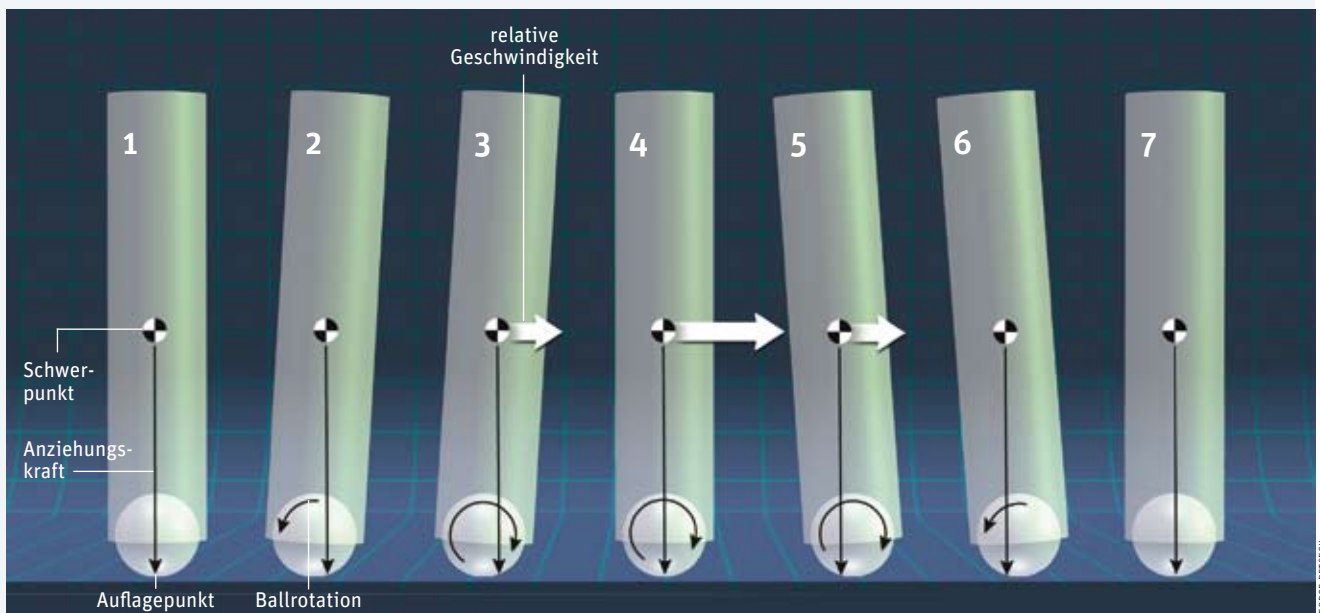
Ähnlich wie ein Zirkusclown steht der Ballbot auf seiner Kugel. Dabei handelt es sich um eine hohle Aluminiumkugel, überzogen mit einer dicken Gummischicht. Weil die Rollen immer über den Ball gleiten, muss deren Reibung und Dämpfung ausgeglichen werden. Zwischen Ball und Rumpf tragen drei Kugellager das Gewicht des Roboterkörpers. Die Ballrotation und damit die zurückgelegte Wegstrecke messen wir mit Lichtsensoren und einem Streifensystem auf einer antriebslosen Leitwalze.

Jeder Ballbot kennt die Senkrechte und errechnet daraus, wie er den Ball drehen muss, um sein Gleichgewicht zu halten und sich fortzubewegen. Physika-

## ROLLEN VON A NACH B

**UM BALANCE ZU HALTEN**, muss ein Ballbot seinen Schwerpunkt genau über dem Auflagepunkt halten (1). Die Maschine bestimmt ihren momentanen Zustand mit Hilfe von Richtungs- und Neigungssensoren, die feststellen, wo »oben« ist, und die Lage des Körpers mit der Senkrechten vergleichen. Während der Bewegung reguliert der Ballbot laufend seinen Schwerpunkt. Um zum Beispiel von A nach B zu gelangen, bewegt er den Ball leicht in die zur geplanten Bewegung entgegengesetzte Richtung (2). Das kippt den

Roboter leicht nach vorne, sodass er sich in Bewegung setzt. Als Nächstes dreht der Ball sich in die Richtung der Bewegung, um vorwärts zu beschleunigen (3). Solange sich der Roboter mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, muss er nahezu senkrecht stehen (4). Die umgekehrten Aktivitäten müssen beim Bremsen eingeleitet werden (5, 6), was den Ballbot zum Stehen bringt (7). Bei Steigungen muss der Körper sich leicht vorwärts in die Schräge hineinlehnen, um sein Gleichgewicht zu halten.





lisch gesprochen ist ein Ballbot im Prinzip ein umgedrehtes Pendel, ein System also, das Forscher bestens untersucht haben. Wir benutzen Methoden der Theorie optimierter Steuerungen, um den Ballbot an sein Ziel zu bringen und gleichzeitig den Aufwand dafür zu minimieren.

Der Roboter hat acht interne Zustände, um diese Lösungswege umzusetzen: vier für seine Vorwärts-rückwärts-Bewegung und vier für die Rechts-links-Bewegung. Für jede der Richtungen berechnet das System aus den Sensordaten, wo sich der Roboter gerade befindet, wie schnell er sich bewegt und welche Neigung der Körper einnimmt.

### MINIMALE WIRKUNG

Für die Beschreibung der Roboterbewegung verwenden wir ein vereinfachtes lineares mathematisches Modell. Rudolf Kalman, ein ungarisch-amerikanischer Systemtheoretiker, hat 1960 eine elegante Methode entwickelt, wie man Kontrollstrategien aus solch einem System ableitet, die er »linear-quadratischer Regulator« nannte. Er ging davon aus, dass eine Messung der internen Systemzustände proportional zu den Werten des internen Systemzustands selbst ist. Außerdem nahm er an, dass die Zustände sich mit der Zeit proportional zum Zustand selbst ändern, zusammen mit einem Beitrag, der diverse Regelungsprozesse berücksichtigt, beispielsweise die Wirkung der Motordrehmomente.

Kalmans Verfahren folgt, technisch gesprochen, dem Prinzip der minimalen Wirkung. Die Lösung der Minimierung liefert einen Satz von Konstanten, der, multipliziert mit aktuellen Daten des Systemzustands, eine bevorzugte oder optimale Regelungsanweisung erstellt, die der Ballbot umsetzen muss. Diese Be-

rechnungen laufen im Hauptcomputer des Roboters mehrere hundert Mal in der Sekunde ab.

Soll der Ballbot einfach still stehen bleiben, dann versucht die Kontrollstrategie seine Geschwindigkeit, Neigung und Kipptrate auf null zu reduzieren. Gleichzeitig minimiert sie die dafür nötige Regelungsaktivität. Lautet das Ziel dagegen, von einem Ausgangspunkt A zu einem Zielpunkt B zu gelangen, dreht die Regelung den Ball rückwärts (retrograd). Dadurch neigt sich der Körper in Richtung des Ziels, sodass der Roboter nach vorne beschleunigen kann. Sobald er sich der Zielposition nähert, beschleunigt der Ball automatisch, um sich nun in die Gegenrichtung zu neigen und den Ballbot anzuhalten.

Wir kommunizieren mit dem Ballbot über eine kabellose Verbindung. Wir planen, das Gerät um Arme und insbesondere einen Kopf zu ergänzen, der nicken und sich drehen kann, zwei Augen hat sowie weitere Sensoren. Mit diesen Erweiterungen soll der Roboter einen größeren Grad an Autonomie bekommen. Damit wollen wir untersuchen, inwieweit sich solche mobilen Geräte im Umfeld von Menschen in deren Alltagsumgebung bewegen können; außerdem haben wir vor, seine Geschwindigkeit, Sicherheit und Navigationskünste mit denen klassischer, statisch stabiler Roboter zu vergleichen.

Unsere Hypothese ist, dass sich Letztere in einer technologischen Sackgasse befinden könnten, wenn sie in solchen Umgebungen ohne Probleme navigieren sollen.

Wir sind keineswegs die Einzigen, die auf dynamisch stabile Prototypen setzen. Andere Forschungsteams haben zweirädrige Roboter gebaut, die in einer Dimension, der Rollrichtung, dynamisch stabil

sind, in der anderen Richtung jedoch statisch stabil. Obwohl diese Geräte sich also nicht omnidirektional bewegen können wie unsere Ballbots, erweisen auch sie sich als viel versprechend, besonders im Außenbereich.

Es mag sein, dass sich auf lange Sicht dynamisch stabile, zweifüßige Einheiten, vielleicht auch in humanoider Form, durchsetzen werden, insbesondere wegen ihrer Fähigkeit, Treppen zu steigen. Gruppen in aller Welt entwickeln solche komplexen und teuren Maschinen.

In der Zwischenzeit aber bilden Ballbots jedenfalls interessante und effektive Studienobjekte, die zeigen, wie mobile Roboter mit Menschen in belebter Umgebung dynamisch und elegant interagieren können. ◀



**Ralph Hollis** ist Forschungsprofessor am Robotik-Institut der Carnegie Mellon University in Pittsburgh ([www.ri.cmu.edu/people/hollis\\_ralph.html](http://www.ri.cmu.edu/people/hollis_ralph.html)). Er promovierte 1975 in Festkörperphysik an der Universität von Colorado. Bevor er zur Carnegie Mellon University ging, arbeitete er bei North American Aviation und am Thomas J. Watson Forschungszentrum bei IBM.

A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouseball drive. Von T. Lauwers et al. in: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2006

One is enough! Von T. Lauwers, G. Kantor und R. Hollis in: Robotics Research: The Twelfth International Symposium, October 2005 ([www.ri.cmu.edu/pubs/pub\\_5459.html](http://www.ri.cmu.edu/pubs/pub_5459.html))

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/874885](http://www.spektrum.de/artikel/874885).

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **SpektrumTALK** unter [www.spektrum.de/talk](http://www.spektrum.de/talk).