

Wie die Technik laufen lernt

Prof. Dr. Holk Cruse und Prof. Dr. Friedrich Pfeiffer

Holk Cruse lehrt seit 1981 an der Fakultät für Biologie der Universität Bielefeld. In seiner Forschung beschäftigt er sich mit der Kontrolle von Verhalten am Beispiel des Laufens von Insekten und der Armbewegung von Menschen sowie mit dem Zusammenhang zwischen motorischer Kontrolle und Kognition.

Friedrich Pfeiffer wurde 1935 in Wiesbaden geboren, studierte an der TH-Darmstadt Allgemeinen Maschinenbau, promovierte 1965 in Aerodynamik und kehrte nach 16 Jahren Industrietätigkeit bei Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB) an die Hochschule zurück (ordentlicher Professor für Mechanik an der TU-München). Seine Interessensschwerpunkte liegen auf den Gebieten der Dynamik und Regelung mechanischer Systeme, der Robotik und hier speziell im Bereich der Laufmaschinen.

Biologische Systeme, insbesondere Tiere und Menschen, laufen, schwimmen und fliegen; technische Transportgeräte rollen, schwimmen und fliegen. Dies ist jedenfalls der heutige Stand. Eine typische Komponente der biologischen Fortbewegung ist das Bein, das während der Evolution, ähnlich dem Flügel, aus den Flossen von Meeresbewohnern hervorging. Eine ebenso typische Komponente der technischen Fortbewegung ist das Rad, gewissermaßen der Urtyp eines menschlichen Artefakts, das es in der Natur nicht gibt. Beine, Flügel, Flossen erlauben eine einfache Lösung logistischer Probleme, wie etwa den Transport von Lasten. Ihre instrumentelle Realisierung ist auf Bewältigung einer ungeordneten und häufig sich in unvorhersehbarer Weise ändernden Umgebung eingestellt; die technische Fortbewegung braucht zumindest zu Lande organisierte Trassen und Flächen, Schiffe brauchen Häfen, Flugzeuge Landebahnen.

Die Geschwindigkeiten biologischer Fortbewegung sind recht bescheiden und orientieren sich häufig an den Anforderungen des Jägers und des Gejagten, des Räubers und des Opfers, aber auch, wie bei Vögeln und Fischen und selbst bei Insekten, an der Bewältigung sehr großer Entfernungen. Geschwindigkeiten technischer Systeme sind um Größenordnungen höher. Sie erfordern daher auch Energien, die biologischen Systemen gar nicht zur Verfügung stehen. Dennoch: die Ausnutzung biologischer Ressourcen erfolgt ungleich effizienter als in der Technik. Das gilt auch für das Laufen. Es lohnt sich daher, trotz der völlig unterschiedlichen Problemstellungen in Biologie und Technik, einmal hinzuschauen, wie die Biologie die Probleme löst. Technisches Laufen ist also bezüglich Qualität, Effizienz und Intelligenz vom biologischen Laufen weit entfernt. Die biologische Konstruktion von Antrieben etwa über Gelenke und Muskeln ist effektiver, meistens auch leichter, bestimmt anpassungsfähiger und energiefreundlicher als technische Antriebe.

Darüber hinaus bieten Muskelgruppen, häufig jedenfalls, eine gewisse Redundanz der Bewegungserzeugung, was zum Beispiel dann einen Vorteil darstellt, wenn einige Muskeln ermüden. Biologische Regelkonzepte reagieren schnell und intelligent auf Änderungen der Umgebung. Dies kann man technisch zum heutigen Zeitpunkt kaum nachbilden. Biologische Systeme besitzen selbstlernende Eigenschaften, sind daher extrem anpassungsfähig und können sich bis zu einem gewissen Umfang selbst reparieren. Erste Ansätze für selbstreparierende Systeme gibt es in der Raumfahrt, von biologischer Perfektion sind wir dabei aber noch weit entfernt.

Die sensorische Ausstattung biologischer Systeme ist überwältigend. Biologische Sensoren überwachen jedes Detail eines Bewegungsablaufes in vollständiger und vielfach redundanter Weise, sodass den Regelstrukturen innerhalb und außerhalb des Gehirns Informationen über den augenblicklichen Bewegungszustand vorliegen, wie sie technisch nicht nachzuvollziehen wären. Erstaunlich ist dabei die Tatsache, dass hierzu nur selten neue und unbekannte physikalische Prinzipien angewendet, sondern vorhandene und bekannte nur wesentlich besser genutzt und realisiert werden. Das Bein als das zentrale Instrument des Laufens hat sich im Verlauf einer Jahrmillionen dauernden Evolution an verschiedenste Laufforderungen angepasst. Will man Laufmaschinen bauen, so sollte man zunächst die biologischen Lösungen nach ihrem konstruktiven Ideeninhalt abfragen. Technisch werden am häufigsten sechsbeinige und an zweiter Stelle vierbeinige Maschinen realisiert, da sie von der Laufstabilität her sehr gutmütig sind. Zweibeiner finden sich weniger oft, da zweibeiniges Laufen immer auch dynamische Elemente enthält und daher schwerer zu verwirklichen ist.

Als Vorbild für sechsbeiniges Laufen dient seit Jahren die Stabheuschrecke, die seitens der Biologie besonders gut erforscht ist. Deutschland hält hier eine internationale Spitzenstellung. Einige der in Deutschland wie auch in den USA und in Japan verwirklichten sechsbeinigen Laufmaschinen haben diese Bein konstruktion sowie die bei Stabheuschrecken untersuchte dezentrale Kontrollstruktur sinngemäß übernommen und sehr erfolgreich eingesetzt. Sie ist inzwischen weltweit die am meisten verbreitete Regelungsstruktur für sechsbeinige Roboter.

Ein Problem bei der Realisierung solcher technischen Beine besteht im Verhältnis der installierbaren Gelenkleistung zum Gewicht. Dieses Verhältnis von Leistung zu Gewicht nimmt in der Biologie etwa mit der Potenz 1,5 der geometrischen Abmessungen ab. Das Volumen und damit das Gewicht eines Lebewesens wächst mit der dritten Potenz seiner Größe, die Muskelkraft aber nur mit der zweiten Potenz der Abmessungen, da sie näherungsweise der Muskelquerschnittsfläche proportional ist. Dies ergibt ein immer schlechteres Leistungsgewicht für größere Lebewesen, während kleinere Tiere, wie zum Beispiel Ameisen, meistens große Verhältnisse aufweisen. Baut man eine sechsbeinige Maschine nach dem Vorbild von Insekten, so kann man daher deren Leistungsgewichtsverhältnisse mit technischen Mitteln nicht erreichen.

Weltweit dürften 20 bis 30 solcher Sechsheiner existieren, Vierbeiner dagegen nur etwa die Hälfte. Betrachtet man biologische Vierbeiner, so ist von daher die technische Problematik ganz offensichtlich: von der Maus bis zum Elefanten und vom Pfeifhasen bis zum Pferd laufen, traben und galoppieren vierbeinige Tiere. Sie nutzen dabei Bewegungsbereiche, zum Teil in dominanter Weise, die nur noch dynamisch stabilisierbar sind und keine Merkmale statischer Stabilität mehr aufweisen. Als Folge werden nicht nur die Laufmuster komplizierter, da sie Sprünge, Stabilisierung in der Luft, Stoßvermeidung bei den kurzfristigen Bodenkontakten einschließen. Auch die Anforderungen an die Regelungsstrukturen mit aufwendigen adaptiven und intelligenten Eigenschaften sowie beispielsweise an die Kontrolle der Augenbewegungen werden ungleich größer als beim Sechsheiner. Im Rahmen des von der DFG geförderten Schwerpunktprogramms *Autonomes Laufen* werden zwei Vierbeiner entwickelt und gebaut. Vierbeiner bieten eine Reihe von Vorteilen: Sie sind schnell, beweglich, können leichter Hindernisse übersteigen und erfordern wegen der vier Beine geringeren mechanischen Aufwand als Sechsheiner.

Zweibeinige Laufmaschinen orientieren sich verständlicherweise am menschlichen Vorbild, dessen Laufeigenschaften schon seit Jahrzehnten Gegenstand medizinischer Forschung sind. Die kinematischen Abläufe sind daher bestens bekannt, über die dahinterstehende Sensorik weiß man zwar ebenfalls viel, längst jedoch nicht alles. Daher befassen sich auch im Schwerpunktprogramm *Autonomes Laufen* Mediziner und Biologen mit dem Studium von Bewegungsabläufen und Lernvorgängen beim Laufen. Ein Zweibeiner mit Fähigkeiten zum dynamischen Laufen wird zur Zeit im Rahmen des Schwerpunktprogramms *Autonomes Laufen* gebaut. Im Unterschied zu den bisherigen Entwicklungen soll er dynamisch laufen. Darin unterscheidet er sich von den Entwicklungen der Japaner, die im Bereich der zweibeinigen Laufmaschinen weltweit führend sind. Eine bereits sehr weit fortgeschrittene Maschine stellt WABIAN dar, die erstaunliche Laufleistungen erbringt, die nur noch vom HONDA-Mann übertroffen werden, der anscheinend noch leistungsfähiger ist. HONDA veröffentlicht allerdings keinerlei technische Details.

Warum beschäftigen sich Wissenschaftler so intensiv mit dem Laufen? Aus Sicht der Biologen steht die wissenschaftliche Neugier im Vordergrund und damit der Wunsch, komplizierte biologische Strukturen besser zu verstehen. Die Ingenieurwissenschaftler geben eine andere Antwort: Sie betrachten sich als ›Umsetzungswissenschaften‹. Der Ingenieur sucht in der Biologie Ideen und Anregungen für seine gestalterischen Aufgaben.

Ein weiteres Ziel, das heute bereits teilweise zur Realität gehört, ist es, Laufmaschinen in Bereichen einzusetzen, die für Menschen unzugänglich sind, etwa in chemisch oder nuklear verseuchten Gebieten, bei Feuer, für Arbeiten unter Wasser und in Rohren sowie für die Abwasser-Entsorgung. Laufmaschinen sollen einmal Routineaufgaben in Büros, Krankenhäusern oder in Haushalten übernehmen. Die beim Bau solcher Maschinen gewonnenen technologischen Kenntnisse können unmittelbar auf Prothesen übertragen werden, was japanische Projekte eindrucksvoll beweisen.

Der Aufsatz ist in forschung 3 – 4 / 2000, S. 21 – 23 erschienen und wurde mit freundlicher Genehmigung der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die ZiF: Mitteilungen zur Verfügung gestellt.