

Friedrich Pfeiffer

Holk Cruse

**Autonomes Laufen**

Friedrich Pfeiffer  
Holk Cruse (Hrsg.)

# Autonomes Laufen

Mit 103 Abbildungen und 9 Tabellen

 Springer

**Prof. Dr.-Ing. Friedrich Pfeiffer**

Technische Universität München  
Institut für Mechatronik  
Lehrstuhl für Angewandte Mechanik  
Boltzmannstr. 15  
85748 Garching  
*pfeiffer@amm.mw.tu-muenchen.de*

**Prof. Dr. Holk Cruse**

Universität Bielefeld  
Fakultät für Biologie  
Abt. Biokybernetik  
P.O. Box 10 01 31  
33501 Bielefeld  
*holk.cruse@uni-bielefeld.de*

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek  
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 3-540-25044-1 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

**Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media**

springer.de  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005  
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Digitale Druckvorlagen des Autors  
Umschlaggestaltung: deblik, Berlin  
Herstellung: PTP-Berlin Protago-TEX-Production GmbH  
Gedruckt auf säurefreiem Papier 89/3141/Yü - 5 4 3 2 1 0

---

# Vorwort

## 1 Allgemeine Bemerkungen

Laufen ist eine der genialsten Erfindungen der Natur. Laufen in allen seinen Erscheinungsformen ist in hervorragender Weise an die natürliche Umgebung angepasst, eine Umgebung, die in ihrer ursprünglichen Form eine unglaubliche Vielfalt von Sand bis Eis, von weiten Ebenen bis zu steilen Bergen und von Grasflächen bis zu Wäldern beinhaltet. Laufen ermöglicht Fortbewegung in all diesen Situationen und hat so dafür gesorgt, dass Lebewesen aus den unterschiedlichsten Tiergruppen die Erde bevölkern und erobern konnten. Beim Laufen wird eine Vielzahl unterschiedlicher Subsysteme genutzt, wie etwa ganze Beine, einzelne Muskeln und Gelenke, sowie eine große Zahl von Sensoren. Dazu gehören nicht nur die Mechanosensoren, sondern auch Sehsysteme und die entsprechende Motorik. Mit Hilfe neuronaler Datenverarbeitung müssen diese Teilsysteme auf verschiedenen Integrationsebenen koordiniert werden. Erst das optimierte Zusammenwirken dieser Komponenten befähigt das biologische System zum Laufen und damit zur Fortbewegung. Viele Befunde deuten darauf hin, dass die Fähigkeit, komplexe Bewegungen kontrollieren zu können, auch die Basis für unsere kognitiven Fähigkeiten und damit die Basis für das Entstehen intelligenter Strukturen darstellt. Definiert man Intelligenz als die Fähigkeit, neue unbekannte Situationen schnell zu erfassen und Lösungen für die gezielte Kontrolle von Bewegungen in realen, also durch Hindernisse charakterisierten Umgebung zu finden, so ist Laufen vor dem Hintergrund der biologischen Möglichkeiten eine faszinierende Entwicklung der Natur, in Bezug auf Bewegung in ungeordneter Umgebung und in Bezug auf die dafür notwendige Intelligenz. Nicht zuletzt deshalb stellt Laufen auch für Neurobiologen und Neurologen ein immer wichtiger werdendes Forschungsthema dar.

Laufen und Laufmaschinen wurden von den Ingenieuren vor etwa 20-30 Jahren wieder entdeckt, obwohl es bereits in den Jahrhunderten davor immer wieder Bemühungen gab, Laufmaschinen, zum Teil recht erfindungsreiche, zu bauen. Aber erst in neuerer Zeit haben sich Technologien entwickelt, die den erfolgreichen Bau solcher Maschinen realistisch erscheinen lassen. Es geht da-

bei ja nicht nur um Mechanik, sondern gerade auch um die Verwirklichung von einigermaßen intelligenten Strukturen, die das Laufen erst ermöglichen. Die Entwicklung der Technik in den letzten 300 Jahren hat eine kaum zu überblickende Vielfalt an Maschinen und Anlagen, an Fahrzeugen und Transportsystemen hervorgebracht, die fast ausnahmslos auf die einzigartige Erfindung des Rades gegründet sind. Im Gegensatz zur Biologie benötigen alle technischen Transportsysteme hoch organisierte und teilweise sehr große Flächen. Autos brauchen befestigte Strassen, Züge Schienenwege, Schiffe benötigen Hafenanlagen und Flugzeuge Flughäfen. Dies mag der Preis dafür sein, dass hohe Geschwindigkeiten erreicht und große Massen transportiert werden können, Aspekte, die es in der Biologie in dieser extremen Form nicht gibt. Laufmaschinen werden daher nicht schnell sein im Sinne der modernen Technik, und sie werden auch wenig geeignet sein für die Bewältigung von Massentransporten. Aber sie werden langfristig über Intelligenz verfügen, die Fortbewegung in gefährlichen und unzugänglichen Bereichen zulassen und auch unstrukturiertes Gelände erschließen wird.

Alle Erbauer von Laufmaschinen haben sich an der Biologie orientiert, weshalb es nur sehr wenige rein technische Lösungen gibt. Die biologischen Systeme sind dank einer Jahrmillionen dauernden Evolution an Aufgaben der Fortbewegung angepasst, vom Gesamtsystem her, von allen Komponenten her und nicht zuletzt von ihrer Intelligenz her. Es lohnt also, sich diese Lösungen genauer anzusehen und mit Hilfe der immer wichtiger werdenden Zusammenarbeit mit den Kollegen aus Zoologie, Biomechanik, Neurobiologie und der Neurologie biologische Auslegungsprinzipien zu identifizieren, die Ingenieuren weiterhelfen. Biologische Systeme verwenden Beine statt Rädern, Muskeln statt Elektromotoren, Nervenstränge mit Synapsen statt Bussystemen und eine außerordentlich große Zahl von Sensoren. So verfügt allein der Fühler einer Schabe über 300 000 Sensoren. Auf der anderen Seite haben moderne Technologien vorzügliche Artefakte anzubieten, so etwa schnelle Rechner und Algorithmen, systematische Konstruktionsprinzipien, leistungsdichte Motor-Getriebe-Kombinationen für die Antriebe, hoch entwickelte Sensortechnologien und Mikroprozessoren sowie intelligente Leichtbaustrukturen, um nur einige zu nennen. Es macht daher keinen Sinn, die Biologie und biologische Prinzipien „eins zu eins“ umzusetzen, sondern man sollte solche Prinzipien mit der bestmöglichen Technologie approximieren. Laufmaschinen werden eines Tages genau so beurteilt werden wie andere Maschinen auch, nach Funktionalität, nach Effizienz, Nutzen und Aufwand und damit auch nach Kosten. Wenn die Biologie hierzu Ideen liefert, ist das hoch willkommen. Und selbst wenn die Realisierungen in nicht zu ferner Zukunft der Biologie näher kommen als bisher, so wird das nur in den wenigsten Fällen mit biologienahen, sondern allenfalls mit bioanalogen Komponenten verwirklicht sein. Diese Betrachtungsweise der Bionik statt der Biomimikry ist originär in Deutschland entstanden und weiterentwickelt worden, sie hat zwischenzeitlich über das bundesweite Bionik-Kompetenznetzwerk BioKoN Einzug in die Industrie gehalten.

Im Sinne der Bionik muss daher das Folgende getan werden. Biologen, Biomechaniker, Neurobiologen und Neurologen auf der einen Seite, sofern am Laufen im weitesten Sinne interessiert, sollten ihre Forschungen auch darauf fokussieren, die wesentlichen, beim Laufen von Mensch und Tier eingesetzten Prinzipien herauszufinden. Besonderes Interesse verdienen dabei einerseits die noch zu wenig untersuchten Beiträge elastischer Strukturen und andererseits die Architektur der neuronalen Systeme, die für intelligente Entscheidungen („welches Verhalten soll als Nächstes ausgeführt werden?“) verantwortlich sind. Hier gibt es noch große Lücken, etwa im Bereich des schnellen Laufens oder des Laufens über unstrukturiertes Gelände. Die Ingenieure auf der anderen Seite müssen offen sein für die Diskussion aller neuen biologischen Forschungsergebnisse, um daraus mögliche Umsetzungen für technische Laufmaschinen abzuleiten, und dies auch immer vor dem Hintergrund neuester Technologien. Dies erfordert intensive Vernetzung der Disziplinen als Grundvoraussetzung für zukünftige Erfolge. Der Bau von Laufmaschinen stellt eine hochkarätige Herausforderung dar, er ist Technologie-Treiber ersten Ranges.

Aus Sicht der Biologie verdient ein weiterer Aspekt Erwähnung. Für Biologen eignen sich Laufmaschinen auch als Instrument, um Hypothesen über vermutete biologische Mechanismen zu testen und zu klären. Dies erfordert den Bau besonders flexibler Maschinen, was im Zeit- und Kostenrahmen eines Schwerpunktes nur sehr unvollkommen verwirklicht werden kann. Das Testen biologischer Hypothesen ist daher realistischerweise nur in ausgewählten Fällen mit spezifisch für die jeweilige Fragestellung entwickelten Laufsystemen möglich. Für den Fortschritt in der biologischen Grundlagenforschung ist dieser Beitrag jedoch unerlässlich.

## 2 Ausschreibungstext SPP 1039 von 1996

Der nachfolgende Ausschreibungstext wurde am 20. September 1996 von der DFG an interessierte Kollegen aus Biologie und Ingenieurwissenschaft verschickt:

„Das geplante Schwerpunktprogramm *Autonomes Laufen* soll schwerpunktmäßig Aspekte der technischen Realisierung von Laufmaschinen abdecken. Ebenso willkommen sind biologische Teilvorhaben, deren Ergebnisse unmittelbar in solche technischen Umsetzungen einfließen können.

Hierzu gehören die Frage nach den topologischen Strukturen des Laufens, die Problematik der Regelung und Steuerung und hiermit verbundenen Fragen der Sensoren und der Aktoren, die Modellierung der Dynamik und schließlich die Auslegung und der Bau von ausgewählten Laufmaschinen, auf die sich die Teilnehmer einigen. Um autonomes, also weitgehend selbstständiges Laufen zu ermöglichen, ist weiterhin ein hohes Maß an maschineller Intelligenz vonnöten, die über richtige Laufmuster entscheidet, die unvorhergesehene Laufprobleme bewältigt, die auch in

schwierigem Gelände die richtigen Bewegungsabläufe auswählt und regelungstechnisch realisiert. Dabei sollen auf allen Ebenen, und soweit das technisch sinnvoll erscheint, Forschungsergebnisse aus der Biologie und Neurobiologie des Laufens berücksichtigt und auch technologisch umgesetzt werden. Unter dem Begriff des Laufens wird dabei stets Laufen in einfachem und schwierigem Gelände als auch das Klettern in moderater Form verstanden.

Die Beschäftigung mit der Thematik der Lauftechnologie ist schon aus dem Grund bedeutungsvoll, da bekanntlich weit weniger als die Hälfte der Erdoberfläche mit rädergetriebenen Fahrzeugen erreicht, der Rest jedoch durch Laufen erschlossen werden kann. Diese Aussage gilt erst recht für Planeten in unserem Sonnensystem. Laufmaschinen können eine Vielzahl von erdgebundenen Problemen lösen helfen. Der Zugang zu verseuchten Gebieten, sei es durch Chemie oder Radioaktivität, der Zugriff auf Brandherde, die riesenhafte Aufgabe der Sanierung unseres Abwassersystems, die Bewältigung von Unterwasserarbeiten können durch geeignete Lauftechnologien in neuartiger Weise verbessert oder gelöst werden. Jede Forschung auf dem Gebiet des Laufens wird schließlich auch die Technik von Prothesen voranbringen, wo ja Fragen aktiver Beeinflussung etwa durch Regelung, Fragen der Energieversorgung vielfach noch ungelöst sind.

Die Beschäftigung mit der Lauftechnologie ist auch deshalb interessant, weil die Menschheit ihre technologischen Anstrengungen weitestgehend auf rädergetriebene Systeme konzentriert hat, wobei die Erfindung des Rades eine fundamentale und typisch menschliche Errungenschaft darstellt. Auch diese Technologie ist bei weitem noch nicht ausgereizt. Dennoch bieten die heutigen Möglichkeiten der künstlichen Intelligenz, der Konstruktion, der Sensorik und der Aktorik einen hervorragenden Hintergrund, um Laufmaschinen zu realisieren. Dies haben die Anstrengungen und Erfolge der letzten zwanzig Jahre in USA, Japan und Deutschland gezeigt. Trotz alledem steht die Technologie des Laufens noch in ihren Anfängen. Ein Schwerpunktprogramm wird diese Situation verbessern helfen.

Ziel des Schwerpunktes wird es sein, einige wesentliche Probleme des Laufens zu klären und bei der Umsetzung in Laufmaschinen zu berücksichtigen. Dieses betrifft Fragen der Laufstrukturen, der Laufdynamik, besonders bei Zwei- und Vierbeinern, der Laufregelung und in diesem Zusammenhang der notwendigen Intelligenz für zielorientiertes, sensorgeführtes Laufen. Es betrifft Fragen der Sensorik, der Sensordatenverarbeitung und Aktorik und nicht zuletzt Umsetzungsstrategien. Neben theoretischen Arbeiten muss der vorgeschlagene Schwerpunkt auch Experimente beinhalten, und neben Ingenieuren sollten auch Biologen und Informatiker teilnehmen. Die wichtigsten Themen gliedern sich folgendermaßen:

## **Laufstrukturen**

Bisher scheint auch bei Biologen die Frage nach der optimalen Anzahl der Beine für eine bestimmte Laufaufgabe weitgehend unbeantwortet. Die Natur hat eine Fülle von Beispielen erzeugt und ist für die speziellen Anforderungen in ausgezeichneter Weise ausgerüstet. Dabei sind bestimmte Parameter auch bei erheblicher Variation der Körpergröße erstaunlich konstant. Die Unterschiede in der Anzahl der Anordnung der Beine hängen vermutlich im wesentlichen von der Art der jeweiligen Umweltbedingungen ab, wie etwa Laufen unter Wasser, Laufen mit hoher Geschwindigkeit, hoher Krafterzeugung (z. B. Bohren in der Erde) oder kritischer Stabilitätssicherheit (Klettern). Einzelheiten sind jedoch weitgehend unbekannt. Wir wissen nur, dass die Evolution diese heute vorliegenden biologischen Ergebnisse in hervorragender Weise optimiert hat.

## **Laufdynamik**

Eine einigermaßen zuverlässige Kenntnis der Beinstrukturen wird automatisch mit dem Wissen über die hierfür besten Beinkinematiken verknüpft sein. Dies ist dann Ausgangspunkt für eine Betrachtung der Dynamik und Regelung solcher Systeme. Diese beiden Gebiete sind mitsamt ihrer Sensorik und Aktorik sehr eng miteinander verzahnt. Sinnvoll erscheint zunächst einmal die Betrachtung der Dynamik, da auch beim Bau von Laufmaschinen eine vorherige dynamische Simulation, die dann natürlich auch die Regelung mit einschließt, erfolgen muss. Dynamik bedeutet die Betrachtung der Kräfte und Momente, die notwendig sind, um ein Laufgerät unter Berücksichtigung der Kinematik in Bewegung zu setzen. Dies trifft sowohl für biologische als auch für technische Laufsysteme zu. Die Modellierung derartiger Systeme muss zweckmäßigerweise so erfolgen, dass mit einem einzigen Simulationsprogramm die oben genannten verschiedenen Strukturen abgedeckt werden können. Dies ist in jedem Falle möglich, da bereits heute Rechenprogramme existieren, die gleichermaßen für zwei-, vier-, sechsbeiniges Laufen eingesetzt werden können.

## **Laufregelung und Laufintelligenz**

Die Dynamik macht ohne Regelung keinen Sinn. Regelung beinhaltet Sensorik und Aktorik. Auf dem Gebiet der Regelung von Laufmaschinen können wir besonders viel von der Biologie lernen. Niedrig organisierte Tierarten wie Insekten verfügen offenbar über eine dezentrale Laufregelung, die man näherungsweise durch drei Ebenen beschreiben kann. Solche Regler sind in der Biologie durch biologisch-neuronale Netze realisiert. In der Technik gibt es weltweit viele Anstrengungen, solche neuronale Netze technisch nachzuempfinden. Man kann aber auch die gleiche Funktion

durch entsprechende Auslegung nichtlinearer Regelungen erreichen, wie in jüngster Vergangenheit gezeigt wurde.

Die bei niedrigen Tierarten wie Insekten so hervorragend funktionierende dezentrale Regelung dürfte bei höher entwickelten Lebewesen, also insbesondere bei den Säugern und bei Menschen, dahingehend erweitert sein, dass noch übergeordnete zentrale Regelungs- und Steuerfunktionen hinzukommen. Hierzu gehören Sichtsysteme, die über Hindernisse informieren, aber auch Entscheidungen treffen in Bezug auf das Gangmuster in Abhängigkeit von der gerade zu bewältigenden Umgebung. Der Komplex Regelung und Steuerung für eine Laufmaschine ist also extrem vielschichtig und kompliziert.

### **Sensoren und Aktoren**

Es muss weiterhin die Sensorseite und die Aktorseite abgedeckt sein. Trotz des hohen Entwicklungsstandes der Sensoren sind gewisse Sensoreigenschaften der Natur nicht nachvollziehbar. Man denke an die Fingersensorik beim Greifen oder die Luftsensorik im Fuß. Dennoch muss versucht werden, für eine technisch zu realisierende Laufmaschine solche Sensoreigenschaften wenigstens näherungsweise zu erreichen. Denkt man an übergeordnete Regelungsfunktionen wie Sichtsysteme, so ist auch hier wiederum eine gute Effizienz bei kleinem Gewicht und guter Entscheidungsfähigkeit in Bezug auf das Bild vonnöten.

Die geometrische und mechanische Beschaffenheit des Bodens spielt für eine sichere Platzierung der Beine eines Laufgerätes eine erhebliche Rolle. Dies macht die Entwicklung geeigneter Sensorsysteme zur Erfassung der Bodenbeschaffenheit notwendig. Im Falle mechanischer Eigenschaften (Elastizität, nichtelastisches Nachgeben, Reibungskoeffizienten) kann eine Identifikation über den Laufvorgang selbst erfolgen. Im Falle geometrischer Eigenschaften (Rauigkeit, Körnigkeitsgrad, Bodenwellen, Löcher, Vorsprünge, isolierte Festigkeitszonen etc.) besteht ein Bedarf, bekannte Verfahren des Robotersehens speziell für die Extraktion bodenbeschaffenheitsrelevanter Information zu erweitern. Darüber hinaus kann für technische Anwendungen an weitere Sensortypen wie beispielsweise Ultraschall gedacht werden.

### **Laufexperimente**

Ein Schwerpunktprogramm über Laufen und über Laufmaschinen, biologische und technische, macht nur Sinn, wenn solche Maschinen auch realisiert werden. Natürlich muss sich die Forschergruppe dabei auf einige Objekte einigen. Nach den Erfahrungen der letzten Jahre und im Hinblick auf zukünftige Anwendungen erscheinen laufende Roboter mit zwei und mit vier Beinen sehr aussichtsreich. Das zweibeinige Laufen hätte langfristige hervorragende Chancen im Bereich der Prothetik, das vierbeinige

Laufen mindestens ebenso gute Chancen in allen umweltbelasteten Bereichen wie in Kernreaktoren, unter Wasser, in Feuern, in chemischen Anlagen oder ähnlichem. Daher sollte sich je eine Teilgruppe mit diesen beiden Geräten befassen. Bei beiden Laufmaschinen wäre insbesondere auch das dynamische Laufen, das heißt mit Abheben sämtlicher Füße vom Boden und dem Problem des Wiederaufspringens, besonders interessant.“

### 3 Ablauf des Schwerpunktes

Die ersten Aktivitäten für die Einrichtung eines DFG-Schwerpunktes über Laufen begannen Mitte 1996. Es wurde ein Entwurf für den obigen Text an die DFG geschickt, darauf erfolgte ein Vorgespräch mit Gutachtern der DFG und Vertretern der DFG selbst und schließlich konnte nach einer Befürwortung durch den DFG-Senat der Ausschreibungstext am 20. September 1996 an interessierte Kollegen verschickt werden. Die Bewilligung durch den Senat wurde prinzipiell für sechs Jahre ausgesprochen, wobei nach jeweils zwei Jahren Zwischenberichte und Neuansträge für eine neuerliche Begutachtung zu erstellen waren. Es gingen in dieser ersten Antragsphase insgesamt 32 Anträge aus Biologie und Ingenieurwissenschaften bei der DFG ein. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft lud dann alle Antragsteller nach Bonn-Bad Godesberg zu einer zweitägigen Begutachtung ein. Sie fand am 13./14. März 1997 statt. Von den 32 Anträgen wurden in diesem Verfahren 17 Anträge bewilligt, und zwar acht aus den Bereichen Biologie und Medizin und neun Anträge aus den Ingenieurwissenschaften und verwandten Gebieten. Die ursprüngliche Antragssumme betrug mehr als 11 Mio DM, die bewilligte Antragssumme hielt sich dann mit etwas mehr als 6 Mio DM für zwei Jahre im üblichen Rahmen der Schwerpunktförderung.

Bereits Mitte des Jahres 1998 begann die Diskussion über die weitere Beantragung. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft lud mit einem Schreiben vom 22. September 1998 nahezu sechzig Wissenschaftler ein, Neu- oder Fortsetzungsanträge für den Schwerpunkt zu stellen. Es gingen 26 Anträge mit einer Gesamtsumme von 9,3 Mio DM ein, die am 3./4. Februar 1999 in München im Rahmen eines Berichtskolloquiums begutachtet wurden. Für das dritte und vierte Jahr wurden dieses Mal 18 Anträge bewilligt, und zwar jeweils neun in den Bereichen Biologie und Ingenieurwissenschaften. Die bewilligte Summe für wiederum zwei Jahre betrug 6,7 Mio DM.

Die Diskussion über die dritte Antragsphase begann Mitte 2000. Sie wurde während des Berichtskolloquiums in Köln am 26./27. September 2000 vertieft. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft forderte dann potentielle Teilnehmer auf, Neu- oder Fortsetzungsanträge für die letzte Phase zu stellen und lud zur Begutachtung am 1./2. Februar 2001 nach München ein. Wegen der letzten Antragsphase ging die Zahl der Anträge naturgemäß zurück, und zwar auf 15. Die Antragssumme belief sich auf 5,3 Mio DM für zwei Jahre. Die Gutach-

ter bewilligten 12 der 15 beantragten Vorhaben mit einer Gesamtsumme von 3,72 Mio DM.

Der Schwerpunkt SPP1039 war in seinem Ablauf stets von einer großen Zahl von Öffentlichkeitsaktivitäten, sei es im streng wissenschaftlichen oder mehr im allgemeinen Sinn, begleitet. Folgende offizielle Treffen aller Teilnehmer, also solche Treffen, die teilweise auch von der DFG unterstützt wurden, gab es:

13. März 1997, München: Treffen in kleinem Kreis für eine erste Diskussion des SPP-Ablaufs und der SPP-Strukturierung
14. November 1997, Jena: Alle Teilnehmer, Vorstellung der Einzelprojekte und Abstimmung des weiteren Vorgehens
2. Dezember 1998, Karlsruhe: Alle Teilnehmer, Vorstellung der bisherigen Arbeiten
- 3.-4. Februar 1999, Garching: Alle Teilnehmer, Vorstellung der Arbeiten, Zwischenberichte, Neu- bzw. Fortsetzungsanträge, Begutachtung durch die DFG
- 26.-27. September 2000, Köln: Vorstellung der bisherigen Arbeiten, weiteres Vorgehen bezüglich der Fortsetzungsanträge und der Begutachtung
- 1.-2. Februar 2001, Garching: alle Teilnehmer, Vorstellung der Arbeiten, Zwischenberichte, Neu- bzw. Fortsetzungsanträge, Begutachtung durch die DFG
- 20.-21. Februar 2002, Jena: Alle Teilnehmer, Berichtskolloquium, Stand der Arbeiten kurz vor Ende des Schwerpunktes

Zusätzlich zu diesen Treffen, die immer auch der organisatorischen und wissenschaftlichen Abstimmung und Kommunikation dienen, gab es vielfältige Veranstaltungen in Form von Tagungen, Seminaren, Kolloquien und im mehr allgemeinen Öffentlichkeitsbereich Ausstellungen auf Messen und Fernsehauftritte, besonders im Zusammenhang mit der zweibeinigen Laufmaschine JOHNNIE. Es fanden die folgenden Tagungen, Seminare oder Kolloquien statt, die direkt oder indirekt im Zusammenhang mit dem Schwerpunkt stehen, und die von Teilnehmern des Schwerpunktes organisiert oder mitorganisiert wurden, beispielsweise als Organisator, Vorsitzender oder Vortragender:

- EUROMECH-Kolloquium „Biology and Technology of Walking“, München, March 23-25, 1998, chair and co-chair Pfeiffer and Cruse
- CISM-Course No. 375, “Human and Machine Locomotion” (Eds. Morecki, Waldron), 8.-12. Juli 1996 in Udine, Italy, Lectures on “Theory and Practice of Machine Walking” (Pfeiffer)
- CISM-Course No. 467, “Walking: Biological and Technical Aspects”, (Eds. Pfeiffer, Zielinska), 8.-12. September 2003 in Udine, Italy, chairman and lecturer Pfeiffer, (“Technological Aspects of Walking”)
- ZIF - Colloquium on “Walking Machines – Biological and Artificial Systems”, 4.-5. Juli 2003 Bielefeld, Chairmen Cruse, Pfeiffer
- Interdisciplinary College IK 2004, Günne, Body and Motion 5.-12. März 2004, Chair: Jaeger, Cruse

- Motion Systems 1997 Conference of the Innovationcollege “Motion Systems”, Organizer: Blickhan
- III. GTTB Workshop, 1997, Organizer: Blickhan;
- Motion Systems 2001, Conference of the Innovationcollege “Motion Systems”, Organizer: Blickhan
- Vth World Congress of Biomechanics, 2002, Calgary, Canada, Symposium on Self-Stability 1, 2: Organizer: Blickhan
- Workshop „Autonomous Walking 98“, Fraunhofer IFF, Magdeburg, 25. Juni 1998, Chairman Schmucker
- Plenary Lectures (Prof. Pfeiffer) bei folgenden Tagungen:
  - VDI/VDE Congress „Humanoids 2003“ 1.-3. Oktober 2003 in Karlsruhe, “Walking Machines – From Biology to Technology”
  - CLAWAR 2003, Climbing and Walking Robots, 17.-19. September 2003, Catania, Italy, “Humanoid Robots”
  - IFAC-Workshop on “Modelling and Analysis of Logic Controlled Dynamic Systems”, July 30-August 1, 2003, Irkutsk, Russia, “The Logic of Walking Machine Control”
  - Victor Kaplan Lecture, 21. April 2004, Wien, “Laufende Roboter”
- Invited Lectures (Prof. Cruse) bei folgenden Tagungen:
  - NATO RTO AVT Meeting, Ankara 2000, “Control of hexapod walking - a decentralised solution based on biological data”.
  - NAISO, Information Science Innovations, Dubai 2001. Control of six-legged walking in unpredictable environment – biologically inspired solutions.
  - CLAWAR 2001, Climbing and Walking Robots, September 2001, Karlsruhe, Control of hexapod walking – a decentralized solution based on biological data
  - AMAM 2003, Adaptive Motion of Animals and Machines, 4.-8. März 2003, Kyoto, Japan, Control of hexapod walking in biological systems
  - ISR, Insect Sensors and Robotics, Brisbane, Australien, 23.-26. August 2004, “Stick insects and other walking machines: Control of hexapod walking using a decentralized architecture”.
- Plenary Lectures (Prof. Blickhan) bei folgenden Tagungen:
  - 44th ISC-1999, Ilmenau: “Bionics of running”.
  - AMAM 2000, Montreal: “Robust behaviour of the human leg”
  - SEB 2001, Canterbury “The spider’s jump: Optimum strategies.”
  - dvs-Schwerpunkt Biomechanik 2001, Konstanz: „Robustes Laufen: Biomechanische Grundlagenforschung für Biologie, Robotik und Sport“
  - 3rd ICFSR, 2001, Helsinki: “Adaptivity and robustness of locomotion in animals and humans.”
- Invited Lectures (Prof. Blickhan) bei folgenden Tagungen:
  - ICCPB 1995, Birmingham, UK: „Dynamics of the spider leg.“
  - Gastvortrag Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 2002: „Motion Systems“

- Vortragsreihe „Bionik“ 2002, Urania, Graz, Österreich, “Bewegungsabläufe – Vom Tier zum Roboter.”
- APS Symposion: The influence of comparative physiology on engineering, neuromuscular biological inspiration toward the design of artificial muscle and robots. 2002, San Diego, USA, “Facilitating Control using Intelligent Mechanics in Animals and Machines”
- IK, Günne, Body and Motion, 2004: „Muscle, Motion, and Self-Stability
- Lectures (Prof. Blickhan) bei folgenden Tagungen:
  - IWMC, Bielefeld, 1997 „Jumping in spiders and humans.“
  - Euromech 375, München, 1998.„Elastic mechanisms in fast legged locomotion.“
  - IARP Workshop Biologically motivated robots, Jena,1999.: “From spiders to micromachines.”
  - XIIIth CISB, Zürich, 2001, “The design of the muscle skeletal system and robustness of locomotion.”
  - 6<sup>th</sup>ICVM, Jena, 2001, “Mechanical design and stability of locomotion.”
  - DZG, 2002, Halle: “Selfstability and Robustness of Locomotion.“
  - VIth World Congress of Biomechanics, Calgary, Canada, 2002: “Leg design and jumping in spiders.”
  - ZIF – Colloq. Walking Machines – Biological and Artificial Systems, 2003 Bielefeld, “Self-Stability: From Global Strategies to Local Properties”
- Lectures (Dr. Günther) bei folgenden Tagungen:
  - Workshop Autonomes Laufen, Karlsruhe, 1998 “Computersimulation of human gait in two dimensions.”
  - SEB, 1999: “Adjustment of knee- and ankle stiffness to running and jumping.“
  - IWR-Workshop Biomechanics meets robotics, Heidelberg, 1999 “Walking – an attempt to minimize control effort.”
- Lectures (Dr. Karner) bei folgenden Tagungen:
  - DZG, 1999: “The mechanism of hydraulic pressure production in *Pernia nasula* Schwendinger, 1989 (Aranea, Tetrablemmidae)”
  - SEB, 1999: “Perturbing single legs of running cockroaches (*Blaberus discoidalis* (Serville)).”
- Lectures (Dr. Petkun) bei folgenden Tagungen:
  - Motion Systems, Jena 1997: “Designing a diminutive force plate.”
- Lectures (Prof. Büschges) bei folgenden Tagungen:
  - 6th International Congress for Neuroethology, Bonn, 27.7.-3.8.2001, “Mechanisms of sensory influences in intra- and interjoint control of locomotor patterns in the insect limb”
  - East Coast Nerve Net Meeting, Woodshole/MA, 21.3.-23.3.2003, “Central Pattern Generators and the Control of Multi-jointed Limbs in Locomotion”

- Canadian Physiological Society Meeting, Kelowna, BC, Canada, 28.1.-1.2.2004, “Pattern Generators and the Control of Multi-jointed Limbs in Locomotion”
- 7th International Congress for Neuroethology, Nyborg, Dänemark, 8.8.-13.8.2004, “Pattern Generators and the Control of Multi-jointed Limbs in Locomotion”
- Lecture (Dipl. Biol. O. Ludwig) bei folgender Tagung:
  - Conference on motor control 1999, St. Constantine, Varna, Bulgaria: “Human Walking Stability and Reaction to Disturbances”
- Vorträge (Prof. Schiehlen) bei folgenden Tagungen:
  - 11<sup>th</sup> ROMANSY, Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, 1.-4. Juli 1996, Udine, Italien, “On direct-search optimization of biped walking”
  - UNIVERSITY OF CAPE TOWN, 9. September 1999, Kapstadt, Südafrika, “Multibody dynamics with some applications to biomechanics”
  - 18<sup>th</sup> ASME Biennial Conf. Mech. Vibr. Noise, 9.-12. September 2001, Pittsburgh, USA, „Power demand of actively controlled multibody systems“
  - 14<sup>th</sup> ROMANSY, Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, 1.-4. Juli 2002, Udine, Italien, “Inverse dynamics power saving control of walking machines”
  - WCCM V, 5<sup>th</sup> World Congress on Computational Mechanics, 7. – 12. Juli 2002, Wien, Österreich, “Biped walking machines: a challenge to dynamics and mechatronics”

Mit den realisierten Laufmaschinen wurden eine ganze Reihe von Ausstellungen und Fernsehveranstaltungen durchgeführt. Sie sind im Folgenden aufgeführt:

- Premiere: GEO-TV, 24.03.1998 (TARRY)
- Neue Magdeburger Experimente, Magdeburg, April 1998 (KATHARINA)
- Wissenschaftliche Pressekonferenz, Bonn, 15. Dezember 1998 (KATHARINA)
- Knoff-hoff Show im Januar 1999 (KATHARINA)
- Sonderausstellung „Zukunft Leben“ im Deutschen Museum anlässlich des 50jährigen Jubiläums der Fraunhofer Gesellschaft, München, 27. März bis 30. April 1999 (KATHARINA)
- IARP Workshop „Biologically Motivated Service Robotics“, Jena, 21.-23. Juni 1999 (KATHARINA)
- Tag der offener Tür an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Januar und September 2001 (KATHARINA)
- Hannover Messe 2001 (JOHNNIE)
- CLAWAR 2001, Karlsruhe, September 24.-26.9. 2001 (JOHNNIE)
- Sonderausstellung „Computer-Gehirn“ des Heinz Nixdorf Museumsforum Paderborn (JOHNNIE, TARRY)

- „Sensomotorik bei Mensch und Maschine“, Residenz München, 22.11.2002 (JOHNNIE)
- Hannover Messe 2003 (JOHNNIE)
- „Walking Machines, Biological and Artificial Systems“, ZIF Bielefeld, 4.-5. Juli 2003 (JOHNNIE)
- Knoff-hoff Show, München, 2.10.2003 (JOHNNIE)
- Eröffnung der INI-TUM (Aninstitut Audi/TUM) in Ingolstadt, 30.10.2003 (JOHNNIE)
- DFG-Wissenschaftssommer Stuttgart, 25. September bis 1. Oktober 2004 (JOHNNIE)

## 4 Dank

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft und unseren Gutachter-Kollegen sei für die großzügige Unterstützung über insgesamt sechs Jahre sehr herzlich gedankt. Die Finanzierung von rund 17 MioDM hat uns allen wirkungsvoll geholfen, vielen neuen Ideen nachzugehen und dabei Vieles erfolgreich umzusetzen. Unser Dank gilt dabei besonders Herrn Dr.-Ing. Jürgen Hoefeld, der über die Jahre hinweg und immer mit sehr viel Verständnis und vor allem auch mit der häufig notwendigen Geduld unseren Schwerpunkt begleitet hat. Gedankt sei aber auch allen Teilnehmern, die mit viel Engagement und mit vielen überzeugenden Konzepten diesen Schwerpunkt zum Erfolg führten.

Einem glücklichen Umstand verdanken wir die Umsetzung der Ergebnisse des Schwerpunktes in einen Film, der von Frau Kerstin Hoppenhaus an der Filmakademie Ludwigsburg als Diplomprojekt erstellt wurde. Die Direktorin des DFG-Bereiches Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, Frau Dr. Eva-Maria Streier, hat diese DVD-Produktion spontan unterstützt. Auch dafür unseren herzlichen Dank, der im Übrigen auch für vielfältige Hilfen bei anderen Öffentlichkeitsbemühungen gilt.

Schließlich möchten wir dem jetzigen Leiter des Lehrstuhls für Angewandte Mechanik, Herrn Professor Dr.-Ing.habil. Heinz Ulbrich, für die Möglichkeit danken, dass die Arbeiten für den SPP 1039 ohne Probleme über den Ruhestandszeitpunkt von Prof. Pfeiffer hinaus zu Ende geführt werden konnten. Besonders gilt das für den Einsatz von Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Lohmeier, ohne dessen redaktionelle Arbeiten und den damit verbundenen Umsetzungen am Rechner der vorliegende Band in dieser Form nicht möglich gewesen wäre.

Garching, Bielefeld, Dezember 2004

*Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing.E.h. Friedrich Pfeiffer, Koordinator  
Prof. Dr.rer.nat. Holk Cruse, stellvertretender Koordinator*

---

# Inhaltsverzeichnis

---

## Teil I Grundlagen

---

- 1 Vom Kriechen zum Laufen: Evolution des Laufens mit Genetischer Programmierung auf beliebigen Morphologien**  
*Wolfgang Banzhaf, Jens Ziegler* ..... 3
- 2 Schnelle Bewegungen bei Arthropoden: Strategien und Mechanismen**  
*Reinhard Blickhan, Sergei Petkun, Tom Weihmann, Michael Karner*... 19
- 3 Nutzung aktiver Antennenbewegungen zur Hindernisdetektion und Steuerung von gezielten Greifbewegungen bei Insekten**  
*Volker Dürr* ..... 47
- 4 Periphere Kontrolle sensorischer Signalflüsse: Datenreduktion und -selektion**  
*Harald Wolf*..... 63
- 

## Teil II Zweibeiniges Gehen

---

- 5 Energieabsorption, Energiespeicherung und Arbeit bei schneller Lokomotion über unebenes Terrain**  
*Reinhard Blickhan, Veit Wank, Michael Günther* ..... 71
- 6 Dynamik und Anpassungsvorgänge bei der Laufkoordination des Menschen**  
*Werner Nachtigall, Bernhard Möhl* ..... 97

<b>7 Dreidimensionale biomechanische Modellierung und die Entwicklung eines Reglers zur Simulation zweibeinigen Gehens</b>	
<i>Hanns Ruder, Arnim Henze, Renata Gandini</i> .....	107
<b>8 Entwurf und Realisierung einer zweibeinigen Laufmaschine</b>	
<i>Friedrich Pfeiffer</i> .....	121
<b>9 Schwingungstilgung und Stoßminderung bei zweibeinigen Laufmaschinen</b>	
<i>Werner Schiehlen</i> .....	147
<b>10 Perzeptionsbasiertes humanoides Gehen</b>	
<i>Günther Schmidt</i> .....	161

---

**Teil III Vierbeiniges Gehen**

---

<b>11 Rechnerarchitektur, Sensorik und adaptive Steuerung einer vierbeinigen Laufmaschine mit dynamisch stabilem Gang</b>	
<i>Rüdiger Dillmann</i> .....	175
<b>12 Autonomes hydraulisch angetriebenes Schreitfahrwerk ALDURO</b>	
<i>Manfred Hiller</i> .....	191
<b>13 Kinematisches Modell und Dynamiksimulation vierbeinigen Laufens von Säugetieren</b>	
<i>Martin S. Fischer, Hartmut Witte</i> .....	201
<b>14 Mechanische Modellbildung quadrupeder Lokomotion</b>	
<i>Manfred Hiller</i> .....	225

---

**Teil IV Sechsbeiniges Gehen**

---

<b>15 Neuronale Mechanismen der Gelenkkopplung bei Einzelbeinbewegungen von Insekten</b>	
<i>Ansgar Büschges</i> .....	241
<b>16 Hexapodes Laufen, von der Biologie zur Simulation und zurück</b>	
<i>Holk Cruse, Josef Schmitz</i> .....	259
<b>17 Neuronale Bewegungskoordination und -steuerung für autonome Laufmaschinen</b>	
<i>Martin Frik</i> .....	273

**18 Multisensorielle Verfahren zur Bewegungssteuerung  
sechsbeiniger Schreitroboter**  
*Ulrich Schmucker* ..... 281

---

## Autoren

**Prof. Dr. Wolfgang Banzhaf**

Universität Dortmund  
Fachbereich Informatik  
Lehrstuhl für Systemanalyse

**Prof. Dr. Reinhard Blickhan**

Friedrich Schiller Universität Jena  
Fakultät für Sozial- und Verhaltenswissenschaften  
Lehrstuhl für Bewegungswissenschaft

**Prof. Dr. Ansgar Büschges**

Universität zu Köln  
Zoologisches Institut  
Lehrstuhl II/Tierphysiologie

**Prof. Dr. Holk Cruse**

Universität Bielefeld  
Fakultät für Biologie  
Biologische Kybernetik/Theoretische Biologie

**Prof. Dr. Rüdiger Dillmann**

Universität Karlsruhe  
Fakultät für Informatik  
Institut für Rechnerentwurf und Fehlertoleranz

**Dr. Volker Dürr**

Universität Bielefeld  
Fakultät für Biologie  
Biologische Kybernetik und Theoretische Biologie

**Prof. Dr. Martin S. Fischer**

Friedrich-Schiller-Universität Jena  
Institut für Spezielle Zoologie und Evolutionsbiologie mit Phyletischem-Museum

**Prof. Dr. Martin Frik**

Gerhard-Mercator-Universität  
Duisburg  
Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Lehrstuhl für Technische Mechanik

**Prof. Dr. Dr. h.c. Manfred Hiller**

Universität Duisburg-Essen  
Institut für Mechatronik und Systemdynamik  
Lehrstuhl für Mechatronik

**Prof. Dr. Bernhard Möhl**

Universität des Saarlandes, Saarbrücken  
FB 8 Biologie  
FR 8.4 Zoologie

**Prof. Dr. Werner Nachtigall**

Universität des Saarlandes, Saarbrücken  
FB 8 Biologie  
FR 8.4 Zoologie

**Dr. Sergei Petkun**

Friedrich Schiller Universität Jena  
Fakultät für Sozial- und Verhaltens-  
wissenschaften  
Lehrstuhl für Bewegungswissenschaft

**Prof. Dr. Dr. E.h. Friedrich  
Pfeiffer**

Technische Universität München  
Fakultät für Maschinenwesen  
Lehrstuhl für Angewandte Mechanik

**Prof. Dr. Hanns Ruder**

Universität Tübingen  
Institut für Astronomie und  
Astrophysik,

**Prof. Dr. Prof. E.h. Dr. h.c.  
Werner Schiehlen**

Universität Stuttgart  
Institut B für Mechanik

**Prof. Dr. Dr. E.h. Günther  
Schmidt**

Technische Universität München  
Fakultät für Elektrotechnik und  
Informationstechnik  
Lehrstuhl für Steuerungs- und  
Regelungstechnik

**Prof. Dr. Josef Schmitz**

Universität Bielefeld  
Fakultät für Biologie  
Biologische Kybernetik/Theoretische  
Biologie

**Dr. Ulrich Schmucker**

Fraunhofer-Institut für Fabrikbe-  
trieb und -automatisierung IFF,  
Magdeburg

**Prof. Dr. Hartmut Witte**

Technische Universität Ilmenau  
Fakultät für Maschinenbau  
Fachgebiet Biomechatronik

**Prof. Dr. Harald Wolf**

Universität Ulm  
Abteilung Neurobiologie

**Dr. Jens Ziegler**

Universität Dortmund  
Fachbereich Informatik  
Lehrstuhl für Systemanalyse

Grundlagen

# Vom Kriechen zum Laufen: Evolution des Laufens mit Genetischer Programmierung auf beliebigen Morphologien

Wolfgang Banzhaf und Jens Ziegler

Lehrstuhl für Systemanalyse, Universität Dortmund

## 1.1 Zusammenfassung

Aus welchen Gebieten auch die Problemstellungen entstammen, die zu Entwurf und Konstruktion eines Laufroboters führen, eines muss dieser Roboter immer beherrschen: die stabile Fortbewegung mit Hilfe seiner Beine. Die Implementierung eines Steuerungsprogramms für Laufroboter ist aufgrund der engen Verzahnung von Struktur und Funktion der einzelnen Beine und Glieder eines Laufroboters eine sehr komplexe Aufgabe. Hinzu kommt, dass bedingt durch die unterschiedlichen Roboterarchitekturen, die sich in der Anzahl der Beine, der Anzahl der Gelenke pro Bein, in den geometrischen Abmessungen und Massen und vielen weiteren Details unterscheiden, keine kanonische Form für den Entwurf einer Steuerung für Laufroboter existiert. Eine Möglichkeit zur Umgehung dieses Problems besteht darin, die Kontrollprogramme nicht manuell zu implementieren, sondern Verfahren zu entwickeln, die automatisch für beliebige Roboterarchitekturen optimierte Laufprogramme generieren. Für den Fall der Evolution von Laufrobotersteuerungen wird die Güte der Lösungen bestimmt, indem die in den Individuen kodierte Laufrobotersteuerung ausgeführt und die Qualität des Programms ermittelt wird. Evolutionäre Algorithmen sind bekannt für ihre Kreativität bei komplexen Problemstellungen und haben sich vielfach bewährt, indem sie Lösungen generiert haben, deren Leistungsfähigkeit oft den manuell erstellten Lösungsansätzen gleichkam oder sie sogar übertraf.

Die Evolution von Laufrobotersteuerungen mit Genetischer Programmierung (GP) wurde in diesem Projekt anhand unterschiedlicher Roboterarchitekturen sowohl in der Simulation als auch mit realen Robotern untersucht. Bedingt durch die lang andauernden Auswertungen von Laufprogrammen in Simulation und Realität wurden die Methoden der Evolution - Evaluation, Selektion und Variation - zusätzlich einer gründlichen Analyse unterzogen, um den evolutionären Prozess zur automatischen Generierung von optimierten Laufrobotersteuerungen möglichst zu beschleunigen.

Gegenstand der Analyse waren außerdem die Möglichkeiten zur Parallelisierung des Algorithmus, zur Einsparung von Rechenzeit bei der Auswertung von Laufprogrammen, zur Optimierung von Parametern des evolutionären Prozesses und zur Beschleunigung der Evolution mit Hilfe von Modellen der Fitnessfunktion.

Laufprogramme für eine Vielfalt von Roboterformen in der Simulation konnten erfolgreich evolviert werden. Desweiteren wurden für einen sowohl real als auch als Computermodell existierenden humanoiden Roboter Laufprogramme evolviert. Hierbei wurde das Konzept einer zweiphasigen Evolution in Simulation und Realität erfolgreich angewendet. Experimente mit vierbeinigen Laufrobotern wurden ebenfalls erfolgreich durchgeführt. Die Resultate der Experimente unter Einbeziehung der interaktiven Evolution und der Modellierung der Fitnessfunktion zeigten eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Standardalgorithmus.

## 1.2 Arbeitsbericht

Der Arbeitsbericht stellt den Stand der Arbeiten zur Evolution von Laufrobotersteuerungen mit Genetischer Programmierung zum Zeitpunkt der Beendigung des Projektes dar.

### 1.2.1 Ausgangslage

Bedingt durch die langwierigen, sowohl personal- als auch materialintensiven Evolutionsexperimente mit realen Robotern hatte sich zu Beginn der letzten Förderperiode ein zweigleisiges Vorgehen herauskristallisiert: einerseits sollte der Einsatz von virtuellen Robotern in einer physikalischen Simulation Evolutionsexperimente leichter durchführbar machen. Auf der anderen Seite sollten die bereits begonnenen Arbeiten an der Entwicklung eines Miniaturhumanoiden weitergeführt werden, um eine Plattform für Experimente mit realen Robotern zu schaffen.

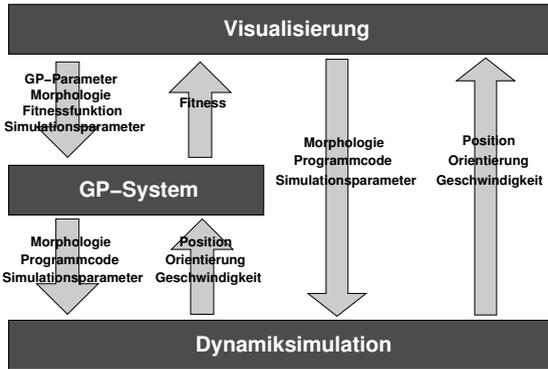
Weiterhin sollten verstärkt strukturierte Roboter Gegenstand von Experimenten werden, nachdem in der vorherigen Förderperiode hauptsächlich die Evolution der Fortbewegungsmuster unstrukturierter Roboter untersucht wurde. Bereits in der ersten Förderperiode vielversprechende Ansätze zur Verbesserung des Konvergenzverhaltens evolutionärer Algorithmen sollten ebenfalls weiter verfolgt werden.

### 1.2.2 Beschreibung der durchgeführten Arbeiten

Entsprechend der Ausgangslage wurden Arbeiten in den Bereichen Dynamiksimulation, methodische Untersuchungen zum Konvergenzverhalten evolutionärer Algorithmen sowie zur Evolution mit realen Robotern durchgeführt.

## Der Einsatz der Dynamiksimulation

Entsprechend den im Antrag formulierten Zielen wurde der Einsatz simulierter Laufroboter systematisch weiterverfolgt. Das zu diesem Zweck entwickelte Robotersimulationssystem SIGEL<sup>1</sup> besteht aus drei wesentlichen Bestandteilen (siehe Abb. 1.1). Über eine Benutzeroberfläche wird das System gesteuert und parametrisiert. Die Roboter und ihre Bewegungen werden dort visualisiert. Das integrierte GP-System ist für die Durchführung von evolutionären Experimenten zuständig. Der Roboter wird gemäß dem in einem Interpreter ausgeführten GP-Individuum (dem Steuerungsprogramm) in der Dynamiksimulation bewegt. Im GP-Modul wird die Evolution von Kontrollprogrammen



**Abb. 1.1.** Der Aufbau des Robotersimulationssystems SIGEL.

für einen ausgewählten Roboter durchgeführt. Durch die Teilkörper und deren relative Bewegungsmöglichkeiten (die Gelenke des Roboters), die Dichte der modellierten Materialien und deren Eigenschaften (z.B. Reibkoeffizienten), sowie die initialen Positionen, Orientierungen und Geschwindigkeiten wird der Roboter vollständig beschrieben und somit zu einem Parameter des Evolutionäre Algorithmus reduziert.

Die Fitness eines Kontrollprogrammes wird berechnet, indem es den Roboter in der Dynamiksimulation bewegt. Diese Bewegungen werden anhand von bestimmten im Vorhinein zu definierenden Kriterien entweder manuell oder automatisch bewertet, was eine Selektion der qualitativ besten Kontrollprogramme durch die Evolution erlaubt. Alle Parameter des Roboters, der Dynamiksimulation und des GP-Systems können in SIGEL zur Laufzeit von Experimenten verändert werden. Die Dynamiksimulation ist das Kernstück des SIGEL-Systems. Ein Roboter wird aktiv bewegt, indem an den definierten Gelenken Drehmomente aufgebracht werden. Wo (in welchem Motor) und

<sup>1</sup> Das Projekt SIGEL ist ein Open-Source-Projekt und unter der URL <http://sourceforge.net/projects/sigel> im Internet für jeden abrufbar.

in welchem Ausmaß die Drehmomente aufgebracht werden, wird durch die Ausführung eines GP-Individuums im Interpreter bestimmt. Durch den Reibschluss einzelner Glieder des Roboters mit dem Boden wird die dadurch verursachte Vortriebskraft simuliert. Der Interpreter der Kontrollprogramme ist direkt mit der physikalischen Simulation verknüpft, in der der Roboter, die Umgebungsbeschreibung, die Reib-, Feder- und Dämpferkoeffizienten sowie die Programm- und deshalb zeitabhängigen Momente in den einzelnen Gelenken zusammen in ein System von Differentialgleichungen überführt werden, das numerisch gelöst wird.

## **Untersuchungen zur Konvergenzverbesserung**

Die vielversprechenden Ansätze zur Verbesserung des Konvergenzverhaltens von Evolutionären Algorithmen (EA) sind in unterschiedlichen Bereichen weiter untersucht worden.

### *Parallelisierung und vorzeitiger Abbruch von Auswertungen*

Die parallele Ausführung von Auswertungen in einem Rechencluster und der vorzeitige Abbruch von Auswertungen bei Unterschreitung eines bestimmten Qualitätslevels sind in die Entwicklung des SIGEL Systems eingeflossen. Ein Geschwindigkeitszuwachs von bis zu 900% konnte allein durch den vorzeitigen Abbruch von Auswertungen erreicht werden, die Geschwindigkeit der Evolution wird weiterhin durch parallele Bewertung der Laufprogramme nahezu linear zur Anzahl der eingesetzten Rechner erhöht.

### *Selbstadaptive Parametertuning*

Ziel dieses Ansatzes ist es, die Zahl der Auswertungen zu reduzieren, indem Parameter des EA in einer Weise modifiziert werden, die es erlaubt, im Verlaufe der Evolution einen zu jedem Zeitpunkt optimalen Fortschritt zum Optimum zu erzielen. Trotz der Tatsache, dass adaptive Methoden der Parametervariation seit längerer Zeit in Genetischen Algorithmen (GA), Evolutionsstrategien (ES) und Genetischer Programmierung (GP) analysiert und verwendet werden, existieren nur wenige Arbeiten zu diesem Thema im Bereich GP. Es wurde deshalb systematisch die Möglichkeit untersucht, mit Hilfe von adaptiven Elementen die Zahl der Fitnessauswertungen in der Genetischen Programmierung soweit wie möglich zu reduzieren. Hierfür wurde ein neuer, erweiterter GP-Algorithmus getestet.

### *Verwendung eines Modells der Fitnessfunktion*

Die hohe Anzahl von Fitnessauswertungen bei EA ist oft verbunden mit zusätzlichen hohen Kosten und/oder hohem Zeitaufwand. Gerade deshalb ist

eine rechenzeit-effektive Approximation der originalen Fitnessfunktion wünschenswert, d.h. die Bestimmung der Fitness eines Individuums mit einer Methode mit reduzierter Laufzeit. Dies ist besonders in den folgenden Fällen interessant: (i) wenn die Auswertung der Fitnessfunktion rechenzeitintensiv ist, (ii) wenn keine mathematische Fitnessfunktion definiert werden kann, oder (iii) wenn zusätzliche mechanische Apparate verwendet werden müssen. Es konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, eine laufzeitintensive Fitnessfunktion durch ein Modell zu ersetzen mit gleichbleibender Qualität der evolvierten Lösungen und gleichzeitig reduzierter Anzahl rechenzeitintensiver Auswertungen.

## Reale Roboter

Für die Experimente mit realen Robotern wurde zum einen der bereits in der vorherigen Förderperiode vorgestellte autonome humanoide Roboter ZORC weiterentwickelt (siehe Abb. 1.5, rechts). Er hat ein Gewicht von ca. 2 kg in voll funktionsfähigem Zustand, d.h. mit Batterie und Prozessor, und eine Höhe von ca. 40 cm. Über eine serielle Schnittstelle können Laufprogramme auf den Roboter überspielt und dort ausgeführt werden. Die Gelenkwinkel der einzelnen Servomotoren werden über eine eigens hierfür entwickelte Elektronik abgefragt und an den analogen Ports zur Verfügung gestellt. Der Roboter besitzt 9 Freiheitsgrade. Auf der anderen Seite wurden Experimente mit einem kommerziellen vierbeinigen Laufroboter durchgeführt, dem SONY Aibo. Der Roboter besitzt 22 Freiheitsgrade, von denen 12 (je drei pro Bein) der Fortbewegung dienen.

### 1.2.3 Darstellung der erzielten Ergebnisse

Die Resultate der in den drei bereits beschriebenen Gebieten durchgeführten Experimente werden nun kurz präsentiert. Detaillierte Beschreibungen finden sich in den entsprechenden Publikationen, auf die an den entsprechenden Stellen jeweils verwiesen wird.

## Untersuchung von selbst-adaptiven Parametereinstellungen

Ziel dieses Ansatzes ist es, die Zahl der Auswertungen zu reduzieren, indem Parameter des EA in einer Weise modifiziert werden, die es erlaubt, im Verlaufe der Evolution einen zu jedem Zeitpunkt optimalen Fortschritt zum Optimum zu erzielen. Zu diesen Parametern gehören vor allem die Mutations- und Rekombinationsrate. Es wurden zwei Methoden der Parameteranpassung an den drei Testproblemen untersucht, die deterministische und die adaptive Variation. Die Parameter sind in allen Experimenten nach einer konstanten Anzahl von Generationen variiert worden. Deterministische Veränderungen sind rein zeitabhängig, adaptive Variationen erfordern es, den Fortschritt innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls zu messen. Dies erfolgt hier global, d.h. es wird

nicht nach einzelnen Operatoren getrennt gemessen. Die aktuellen Mutationswahrscheinlichkeiten zum Zeitpunkt  $t$  für die deterministische Variante lassen sich nun nach Gleichung (1.1) bestimmen

$$m(t) = m_0 \cdot a_m^{k_m \cdot t}, \quad (1.1)$$

wobei  $m_0$  die Mutationswahrscheinlichkeit zu Beginn ( $t = 0$ ) des Experimentes angibt. Die Größe der Änderung wird durch  $a_m \in [0, 1]$  angegeben und  $k_m \in \{-1, 0, 1\}$  beschreibt die Richtung der Anpassung. Die Wahrscheinlichkeit des Crossoveroperators berechnet sich analog zu Gleichung (1.1) durch

$$c(t) = c_0 \cdot a_c^{k_c \cdot t}. \quad (1.2)$$

Bei der deterministischen Strategie sind  $m(t)$  und  $c(t)$  nur monoton änderbar, wohingegen bei der adaptiven Strategie die Parameter nach Gleichung (1.3) auch nicht monoton verändert werden können.

$$m(t) = m_0 \cdot a_m^{k_m \cdot (s(t) - f(t))}, \quad (1.3)$$

wobei  $s(t)$  die Anzahl der Verbesserungen,  $f(t)$  die Anzahl der Verschlechterungen im beobachteten Intervall angibt. Die Crossoverwahrscheinlichkeit ist analog in Gleichung (1.4)

$$c(t) = c_0 \cdot c_m^{k_m \cdot (s(t) - f(t))} \quad (1.4)$$

gegeben. Mutations- und Crossoverwahrscheinlichkeit sind auf das Intervall  $[0, 1]$  beschränkt.

Es ist bemerkenswert, dass keine Variante in allen Experimenten Überlegenheit zeigt, bzw. dass auch keine Variante wegen durchgängig schlechter Resultate ausgeschlossen werden kann [3]. Die stochastische Natur der Daten erschwert einen Vergleich zusätzlich, so dass schwache Auswirkungen (positive oder negative) selbst mit Hilfe von statistischen Methoden nicht leicht zu identifizieren sind. All dies kann als ein Hinweis dafür gesehen werden, dass Parameteranpassungen während der Evolution eine Leistungsverbesserung des Algorithmus nicht garantieren und sogar Verschlechterungen auftreten können. Aus diesem Grund sind die untersuchten Strategien zur Anpassung der Operatorwahrscheinlichkeiten in den Hauptexperimenten des Projektes nicht weiter verfolgt werden.

## Einsatz der Dynamiksimulation

Für den Einsatz der Dynamiksimulation wurde das Tool SIGEL entwickelt und intensiv für Experimente mit verschiedenen Roboterarchitekturen verwendet [1]. Zur Bestimmung der Güte von Laufprogrammen in SIGEL ist es notwendig, eine entsprechende Fitnessfunktion anzugeben. Es hat sich als geeignet erwiesen, hierfür für die Dauer der Simulation einen Korridor festzulegen, innerhalb dessen sich ein ausgezeichnetes Roboterglied (in der Regel das

Torsoelement) bewegen darf. Verlässt das Element diesen Korridor, wird die Fitness auf Null gesetzt und die Simulation kann vorzeitig abgebrochen werden (siehe Abschnitt 1.2.2). Eine aufrechte Bewegung kann evolviert werden, indem der Korridor für das Torsoelement in einer Mindesthöhe  $h_{min}$  oberhalb des Bodens definiert wird. Hierdurch wird ein Selektionsdruck zu Gunsten von Individuen erzeugt, die eine aufrechte Bewegung des Roboters erzeugen<sup>2</sup>. Diese Fitnessfunktion ist formal definiert als

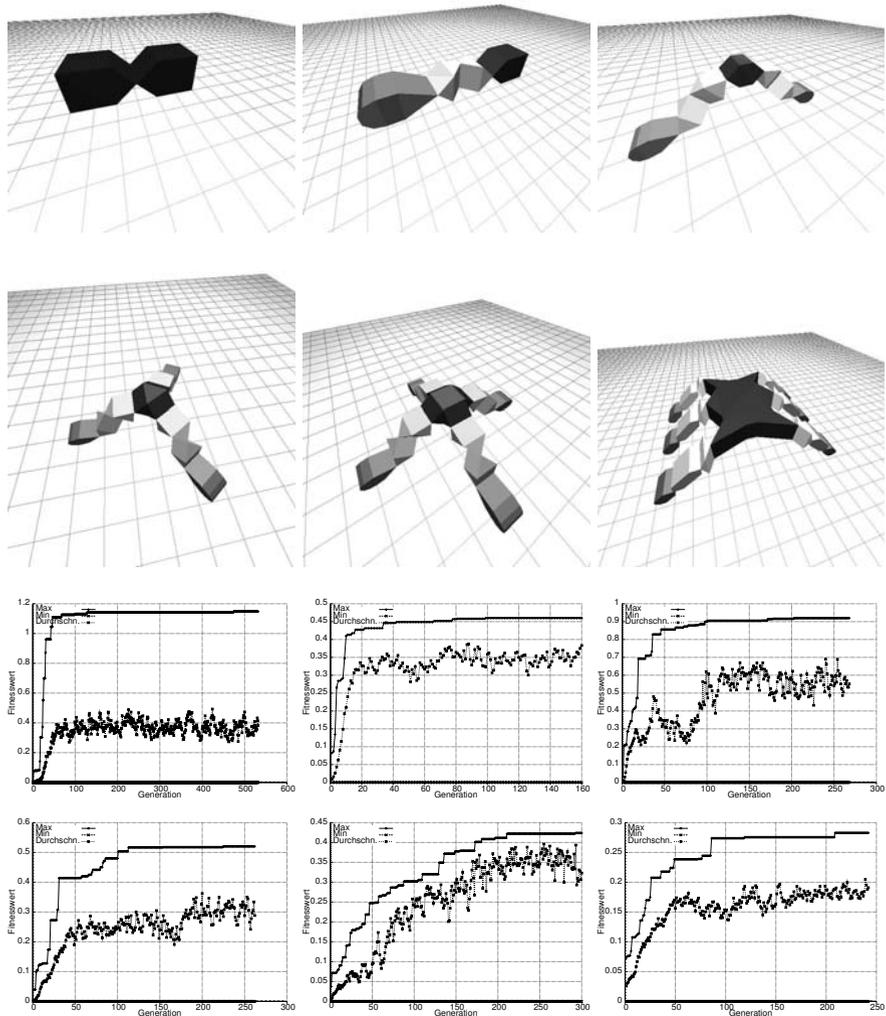
$$fitness = \begin{cases} \frac{(x(t_{end})-x(t_0))}{t_{end}-t_0}, & \text{für } h_{min} \leq h(t) \leq h_{max} \text{ mit } t_0 \leq t < t_{end} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (1.5)$$

Mit dieser Fitnessfunktion, die schnelle Bewegungen über weite Distanzen positiv bewertet (unter der Voraussetzung, dass eine Mindesthöhe eingehalten wird), sind für verschiedene Roboter (siehe Abb. 1.2) erfolgreich Bewegungsprogramme evolviert worden. Es ist hierbei besonders hervorzuheben, dass weder die kinematischen Gegebenheiten des Roboters, noch irgendein anderes Detail des Robotermodells (wie beispielsweise Symmetrien oder die Anzahl der Freiheitsgrade pro Bein) im vorhinein extrahiert und dem System zur Verfügung gestellt wurden<sup>3</sup>.

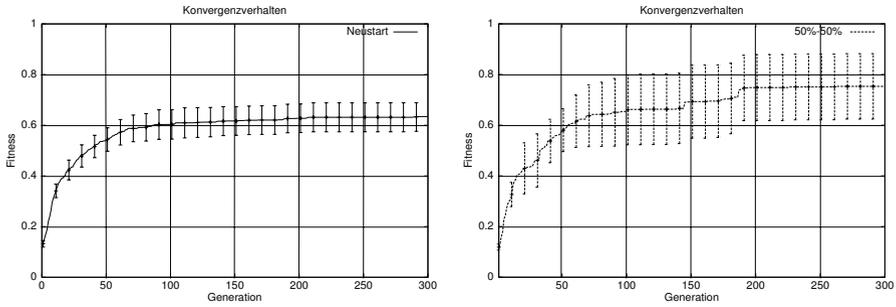
Eine Problematik, die ebenfalls besonders untersucht wurde, ist die Frage nach der Wiederverwendbarkeit bereits evolvierter Individuen. Ein Individuum (oder eine Menge davon) kann dann als wiederverwendbar bezeichnet werden, wenn der Evolutionsprozess durch die Aufnahme der Individuen beschleunigt wird oder die Qualität der besten Individuen signifikant besser ist. Die Frage nach der Wiederverwendbarkeit ist besonders wichtig, wenn versucht werden soll, die Anzahl der Auswertungen bzw. die Gesamtlaufzeit der Evolution zu minimieren. Um diese Hypothese zu testen, wurde der vierbeinige Roboter (Abb. 1.2) für eine weitere Serie von Experimenten verwendet. Ein Bein des Roboters wurde versteift, d.h. die Gelenke dieses Beines sind durch das Steuerungsprogramm nicht länger zu bewegen. Ein ansonsten unvermeidlicher Totalausfall des Roboters kann nun vermieden werden, wenn es möglich ist, mit einer zum Teil aus erfolgreichen Individuen für die ursprüngliche Architektur bestehenden Population schnell neue, für die modifizierte Version des Roboters besser geeignete Laufprogramme zu evolviere. In einer ersten Serie dieses Versuches wurde hierfür ein komplett neues Evolutionsexperiment mit einer zufällig initialisierten Startpopulation durchgeführt, in der zweiten Serie waren 50% der Individuen der Startpopulation in einem früheren Experiment bereits erfolgreich evolviert worden. Die Neuevolution führte zu einer deutlich anderen Fortbewegungsart, deren Rhythmus an Bewegungen

<sup>2</sup> Ohne explizite Höhenangabe bewegen sich die Roboter ausschließlich kriechend fort.

<sup>3</sup> Unter der URL <http://ls11-www.cs.uni-dortmund.de/people/ziegler/robotics.html> sind im Internet Videos der für die einzelnen Roboter evolvierten Bewegungsabläufe verfügbar.



**Abb. 1.2.** Die verwendeten Roboter besitzen eine unterschiedliche Anzahl von Freiheitsgraden: zwischen einem (erste Reihe links) und 18 (zweite Reihe rechts). Die dazugehörigen Fitnessverläufe geben die Geschwindigkeit der evolvierten Bewegungsabläufe der Roboter in  $\frac{m}{s}$  an.



**Abb. 1.3.** *Links:* Durchschnittliche Fitness und Standardfehler bei der Neuevolution mit dem modifizierten Vierbeiner. *Rechts:* Durchschnittliche Fitness und Standardfehler bei der Evolution mit dem modifizierten Vierbeiner und 50% zufälligen, 50% vorevolvierten Individuen.

von vierbeinigen Lebewesen erinnert. Die evolvierte Bewegung ist deutlich auf die neue Struktur des Roboters abgestimmt, wohingegen die Individuen aus früheren Experimenten hingegen merklichen Einfluss auf die resultierenden Bewegungsabläufe haben: im zweiten Experiment ist die ruckartige, rutschende Bewegung früherer Experimente zu erkennen. Interessanterweise war das beste Individuum dieser Serie allerdings um 30% schneller als das beste Individuum bei der Neuevolution.

### Hybride Evolution in Simulation und Realität

Unter Umständen ist es wünschenswert, die Güte von Laufprogrammen zu bestimmen, indem sie auf einem realen Roboter ausgeführt werden. Bei Experimenten mit realen Robotern tauchen allerdings mehrere Probleme auf. So ist es schwierig, die Experimente automatisiert durchzuführen. Hierfür notwendig ist zusätzliches Equipment, das den Roboter nach einem Fall wieder aufrichtet und auch dafür sorgt, dass der Roboter das Experimentierfeld nicht verlässt. Das Problem, eine automatische Fitnessbewertung inklusive Bildverarbeitung etc. implementieren zu müssen wird umgangen, wenn stattdessen interaktiv evolviert wird. Hierbei erfolgt die Bewertung der Fitness eines Individuums manuell durch einen Experimentator. Wird turnierbasierte Selektion verwendet, entfällt die Angabe von numerischen Werten zur Beschreibung der Güte von Individuen, die aufgrund der mangelnden Vergleichsmöglichkeiten zum Bewertungszeitpunkt und aufgrund eines fehlenden absoluten Qualitätsmaßstabes problematisch ist. Werden stattdessen die Individuen in Turnieren miteinander verglichen, entscheidet nur der Unterschied zwischen „schlechterem“ und „besserem“ Individuum. Dieser Unterschied ist für einen menschlichen Beobachter mit einer - natürlich subjektiven - Vorstellung von „gutem“ bzw. „schlechtem“ Laufen leicht festzustellen, es ist allerdings schwierig, die entsprechenden Bewertungskriterien mathematisch exakt zu formulieren. Wenn nur offline in der Simulation gelernt wird und die Ergebnisse anschließend auf