

**WS 2007/2008**  
**Seminar: Mobile autonome Roboter**  
Prof. Dr. Christof Röhrig

**Einführung in die Welt der Laufmaschinen**

von: Marc Nordhausen

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung.....</b>	<b>3</b>
1.1 Motivation.....	3
1.2 Was ist Autonomes Laufen.....	3
<b>2. Die Natur als Vorbild.....</b>	<b>4</b>
2.1 Allgemein: Biologische Vorbilder .....	4
2.2 Speziell: Vierbeinige Vorbilder aus der Natur für Laufmaschinen.....	5
2.3 Speziell: Arthropoden als Vorbilder für mehrbeinige Laufmaschinen.....	5
2.4 Problematik bei vielen Beinen - oder: Warum viele Beine?.....	6
<b>3. Klassifizierung der Laufmaschinen.....</b>	<b>7</b>
3.1 Zweibeinige Laufmaschinen.....	7
3.2 Vierbeinige Laufmaschinen.....	8
3.2.1 Anwendungen.....	8
3.2.2.1 Beispiel BigDog.....	8
Aufbau.....	9
Laufmuster / Kinematik.....	9
3.2.2.2 Beispiel Tekken IV.....	9
Aufbau .....	10
Laufmuster / Kinematik.....	10
3.3 Sechsbeinige Laufmaschinen am Beispiel von Tarry.....	11
3.3.1 Anwendungen.....	11
3.3.2 Aufbau Tarry II.....	11
3.3.3 Laufmuster / Kinematik.....	13
3.4 Achtbeinige Laufmaschinen am Beispiel von Scorpion.....	13
3.4.1 Aufbau.....	13
3.4.2 Laufmuster / Kinematik .....	14
3.4.3 Anwendungen.....	14
4. Produkte.....	15
<b>5. Ausblick.....</b>	<b>15</b>
<b>8. Glossar.....</b>	<b>16</b>
<b>9. Quellen.....</b>	<b>16</b>
<b>10. Bildverzeichnis.....</b>	<b>18</b>

# 1. Einleitung

## 1.1 Motivation

Laufmaschinen bieten in einigen Einsatzgebieten klare Vorteile gegenüber rad- und kettengetriebenen Fahrzeugen. Beispielsweise schädigen sie den Untergrund nicht so stark wie ein Panzer, der regelrechte Schneisen mit aufgewühltem Erdreich im Gelände hinterlässt. Das ist beispielsweise ein klarer Vorteil in der Forstwirtschaft, wie man am Beispiel des PlusJack [8], dem Prototypen einer laufenden Holzfällmaschine der Firma Plustech Oy Ltd, sieht. Ein weiterer nennenswerte Vorteil ist die Geländegängigkeit. Kein Fahrzeug im klassischen Sinne kann wie die Laufmaschine Lauron (LAUfender ROboter Neuronal gesteuert [6],[7]) sowohl schweres Gelände bewältigen, als auch klettern, oder, wie die achtbeinige Laufmaschine Scorpion, auf dem Rücken liegend laufen, beispielsweise nach einem Sturz in die Rückenlage. Auf die Laufmaschine Scorpion komme ich im Folgendem noch genauer zu sprechen. Laufmaschinen sind nicht auf Wege angewiesen und können die kürzeste Route nehmen, im Idealfall eine Gerade. Leider gibt es bei der Fortbewegung durch maschinelles Laufen auch Nachteile, welche ich hier nicht verschweigen will. Der Energieverbrauch ist wegen der hohen Anzahl von Servomotoren und dem hohen Rechenaufwand noch recht hoch. Beispielsweise benötigt die zweibeinige Laufmaschine Johnnie siebzehn Servomotoren um sich mit nur 2,4 km/h zu bewegen, die alle mit Strom versorgt werden müssen. Servomotoren von Laufmaschinen müssen in der Regel auch mit Strom versorgt werden, wenn die Maschine sich nicht bewegt, da sie das Gewicht des Roboters halten [22]. Außerdem sind die erreichten Geschwindigkeiten meistens recht gering, besonders im Vergleich zu einer radgetriebenen Maschine gleicher Leistung. Es gab zwar in den letzten Jahren beachtliche Fortschritte, trotzdem stehen wir erst am Anfang. Das sollte uns motivieren, die Nachteile zu überwinden und die Forschung auf dem Gebiet voranzutreiben.

Wegen dem Umfang und der Komplexität der Thematik, kann ich mit dieser Ausarbeitung nur einen Überblick geben und einige Projekte exemplarisch vorstellen.

## 1.2 Was ist Autonomes Laufen

Was ist autonomes Laufen überhaupt? Die Beantwortung, dieser einfach klingenden Frage, ist nicht so einfach, wie man vielleicht glaubt. Problematisch wird es, weil es mehrere Erklärungsansätze gibt, was eine eindeutige Beantwortung erschwert. „Mobile Roboter werden oft schon als autonom bezeichnet, wenn die Sie steuernde Software/Elektronik/Hardware sich auf dem Roboter befindet.“[1] Das würde bedeuten, eine Laufmaschine ist bereits als autonom, wenn die Maschine selbst ohne Steuerung von außen agieren kann. D. h. die Steuerung darf nicht extern über eine Kabelverbindung erfolgen. Diese Definition von Autonomie engt schon sehr ein. Insbesondere wenn man bedenkt, wie komplex die Steuerung mehrbeiniger Laufmaschinen ist und das ein eingebauter Rechner vor wenigen Jahren bei kleineren Maschinen wegen der erforderlichen Leistungsfähigkeit nicht in der Lage war, die Steuerung zu übernehmen, der Rechner hätte größer sein müssen als die Maschine selbst. Außerdem verbrauchen mehrbeinige Laufmaschinen viel Energie. [1] sagt außerdem, dass man an der Art der Energieversorgung (onboard/autarg/kabelgebunden) den Grad der Autonomie beschreibt. Demnach kann eine mobile autonome Laufmaschine zusammenfassend nicht als

## Mobile autonome Roboter: Einführung in die Welt der Laufmaschinen

vollkommen autonom bezeichnet werden, wenn der Steuerungscomputer nicht integriert ist und, bzw. oder, die Energieversorgung von externen Quellen erfolgt.

Diese beiden Probleme der Energieversorgung und Steuerung konnte man vor wenigen Jahren noch nicht lösen, ohne der vorangegangenen Definition von Autonomie zu widersprechen.

Im Allgemeinen definiert man die autonome Fortbewegung bei Mobilrobotern besser mit der Fähigkeit „[...] sich in ihrer Umgebung selbstständig bewegen und agieren [zu] können.“[1] Demzufolge gilt eine Laufmaschine als autonom, wenn die Steuerung der Gliedmaßen selbstständig erfolgt, das heißt, nur die Bewegungsrichtung oder das Ziel vom Bediener vorgegeben wird und keine einzelnen Gliedmaßen vom Bediener gesteuert werden. Der Laufroboter sucht selbstständig eine gangbare Route. Erkennen dabei die Sensoren Hindernisse, werden diese selbstständig umgangen, oder, falls möglich, überstiegen.

Meiner Meinung nach, ist die zweite Definition geeigneter autonome Laufmaschinen zu beschreiben. Den ersten Ansatz sollte man eher benutzen um zusätzlich den Grad der Autonomie zu bewerten. Beispielsweise erfüllt ein Schreitbagger viele Kriterien des ersten Ansatzes, ist aber alles andere als ein Roboter, geschweige denn eine autonome Laufmaschine, sondern nur ein Bagger. Die achtbeinige Laufmaschine Scorpion hingegen erfüllt alle genannten Bedingungen, die Steuerungscomputer und Energieversorgung sind auf der Maschine integriert und der Roboter läuft autonom. Dennoch wird er von den Entwicklern nur als semiautonom eingestuft.

Beim Laufen selbst muss man noch zwei Arten unterscheiden [4]. Da gibt es erstens das statische Gehen. Statisches Gehen liegt vor, wenn der Schwerpunkt des Roboters sich zu jedem Zeitpunkt über den auf den Boden stehenden Beinen befindet, der Roboter also jederzeit stabil steht. Dabei kann er nicht umkippen, es sei denn es wirkt eine externe Kraft auf ihn ein, die ihn umwirft. Des weiteren gibt es das dynamische Gehen und Laufen [4], [5], dabei liegt der Schwerpunkt auch außerhalb des Bereiches über den auf den Boden gesetzten Beinen. Würde hier die Laufbewegung mitten im Schritt abrupt gestoppt, würde der Roboter kippen. Bewegung mit einer Mindestgeschwindigkeit ist erforderlich, damit der dynamische Gang stabil bleibt. Im Extremfall kann die zum Erhalt der benötigten Geschwindigkeit erforderlichen Beinbewegungen dazu führen, dass kurzfristig kein Bein des Roboters den Boden berührt. So kann man es bei Säugetieren, wie rennenden Pferden oder Hunden, beobachten.

## 2. Die Natur als Vorbild

### 2.1 Allgemein: Biologische Vorbilder

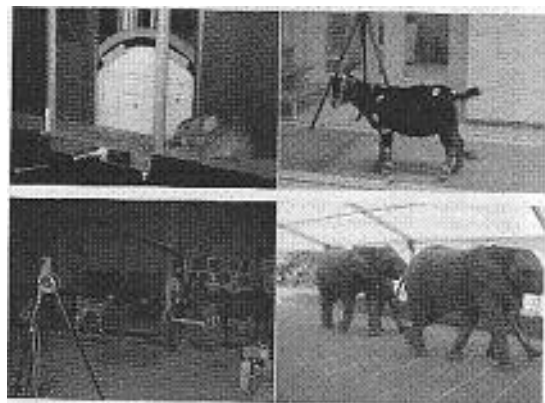
Viele technische Entwicklungen wurden durch Vorbilder aus der Natur inspiriert. Beispielsweise entspricht der Querschnitt der Tragfläche eines Flugzeugs im Prinzip dem eines Vogelflügels, oder die schmutzabweisenden Blätter der Lotusblume inspirierten Forscher dazu, Wandfarben zu entwickeln, die den gleichen physikalischen Effekt wie die Pflanze ausnutzen. Das führt dazu, dass mit dieser Farbe gestrichene Wände schmutzabweisend werden. Der Allgemeine Ansatz dahinter ist es, etwas funktionierendes aus der Natur zu erforschen und dann nachzuahmen bzw. nachzubauen. Wieso sollte man etwas neu erfinden, das sich über Millionen Jahre durch Evolution perfektioniert hat. Im

Kontext der Laufmaschinen bedeutet das beispielsweise, man orientiert sich an Tieren, die sich in der Umgebung, für die ein Roboter entwickelt werden soll, gut fortbewegen können und an das Zielterrain gut angepasst sind, studiert dann deren Gang und versucht ihn technische in Hard- und Software nachzuahmen. Kommt es auf bestimmte Eigenschaften an, beispielsweise Schnelligkeit, kann man sich auch an einem schnellen Läufer in der Natur orientieren, um dessen Schnelligkeit auf die zu entwickelnde Maschine zu übertragen. Wegen der Komplexität muss man dabei zum Teil Vereinfachungen finden. Es ist auch viel Effizienter sich an der Natur zu orientieren, anstatt diese zu ignorieren und etwas neu zu erfinden, das es schon gibt.

### 2.2 Speziell: Vierbeinige Vorbilder aus der Natur für Laufmaschinen

Wie zuvor erläutert, macht es Sinn, sich für die Entwicklung einer vierbeinigen Laufmaschine an vierbeinigen Vorbildern der Natur zu orientieren. So dienen unter anderem Hunde, Maultiere und Pferde als Vorbilder für vierbeinige Laufmaschinen. Ein weiteres konkretes Beispiel ist die Laufmaschine Tekken I [20], die einem vierbeinigen Säugetier nachempfunden ist [10][11] und dessen Laufmuster dem eines Hundes ähnelt, dazu später mehr.

Erkenntnisse zum Gang von Tieren gewinnt man, indem Tiere mit Reflektormarkern bestückt, die dann beim Laufen gefilmt werden. Die Aufnahmen werden später ausgewertet und auf 3D-Modelle übertragen. Die Abbildung rechts zeigt Versuche, aufgenommen am Institut für Wissenschaftlichen Film in Göttingen (IWF), dem Lauflabor Jena, fzmb Bad Langensalza und dem Zoo Erfurth. Als Versuchstiere dienen Pfeifhase, Ziege, Pferde-Fohlen und ein Elefant [12]. Die Auswahl gibt einen kleinen Überblick über die Vielfalt der Wahlmöglichkeiten. Beim IWF wurde sogar Röntgentechnik zum erstellen der Aufnahmen eingesetzt.



[Abb. 1]

### 2.3 Speziell: Arthropoden als Vorbilder für mehrbeinige Laufmaschinen

Arthropoden dienen häufig als Vorbild für Laufmaschinen. Das liegt einerseits daran, dass ca. 80 % aller rezenten Tierarten zur Gruppe der Gliederfüßler gehören, der Großteil davon Insekten [2].

„Die Lokomotion von Arthropoden [...] wird seit Beginn des letzten Jahrhunderts erforscht.“[3] Daher ist bereits viel über ihre Fortbewegung bekannt und deshalb sind Gliederfüßler für eine Vorbildrolle prädestiniert. Ein weiterer Vorteil, den Gliederfüßler als Vorbild bieten, ist eine Eigenschaft ihres Körperbaus, die sie alle gemeinsam haben: Ihr Körper ist in mehrere Segmente unterteilt und jedes Segment besitzt maximal ein Paar Gliedmaßen. Die einzelnen Segmente werden dabei durch ein Exoskelett zusammengehalten. Die Aufteilung der Körper der Gliederfüßler in Segmente kann die Übertragung auf die Technik erleichtern, man hat quasi Vorlagen für Baugruppen.

## **2.4 Problematik bei vielen Beinen - oder: Warum viele Beine?**

Der Gleichgewichtszustand einer Laufmaschine ist immer leicht zu bestimmen wenn sich drei Beine zugleich auf dem Boden befinden. Dann spricht man von einem „stabilen Dreibein“ [13]. Diese statische System ist eindeutig bestimmbar. Sind mehrere Beine gleichzeitig auf dem Boden, heißt das nicht, das das System instabil wird, das Gegenteil ist der Fall, es ist nur nicht mehr so einfach zu berechnen. Man kann sich fragen, weshalb werden dann überhaupt Laufmaschinen mit vielen Beinen entwickelt. Die klaren Vorteile liegen in der Stabilität, sie kippen nicht so leicht um, und wenn doch, landen sie im Idealfall auf den Beinen und können weiterlaufen. Beim zuvor erwähnten dynamischen Gang ist das sogar eines der zugrunde liegenden Prinzipien, das Kippen nach vorne wird durch den nächsten (geplanten) Schritt aufgefangen und ist Bestandteil des Laufens. Ein deutlicher Vorteil bei der Verwendung von vielen Beinen können wir an der Spinne erkennen. Eine Spinne hat acht Beine, hat das Insekt mit den beiden Vorderfüßen Beute gefasst, hat sie noch sechs weitere Beine zur Verfügung, mit der sie die Beute tragend fortbewegen kann. Die zur Fortbewegung nicht benötigten Beine sind nicht überflüssig, es können damit andere Funktionen übernommen werden. Die Spinne kann sich demzufolge bei Verlust eines Beines ohne Probleme fortbewegen. Auf die Technik übertragen, kann dies bedeuten, dass Beine als Lasten- oder Geräteträger benutzt werden können, oder, dass bei Schäden der Laufroboter bis zu einem gewissen Grad mobil bleibt. Das ist umso wichtiger, wenn der Roboter weit ab von Reparaturmöglichkeiten eingesetzt wird, beispielsweise in der Weltraumforschung oder Vermessung zur von Vulkankratern auf der Erde. Stehen alle Gliedmaßen für die Fortbewegung zu Verfügung, ist der Gang umso stabiler.

Ein weiteres Problem ist der erforderliche Rechenaufwand zur Steuerung. Die eingehenden Sensordaten müssen in Echtzeit ausgewertet werden und eine Steuerung der Gelenke (Servos) muss erfolgen. Eine Verzögerung kann zum Sturz führen. Dabei muss beachtet werden, dass es sich um eine Flut von Sensordaten handelt, es muss also genügend Rechenleistung vorhanden sein. Zur Lösung dieses Performanceproblems bediente man sich erneut einem Konzept der Natur. Die Neurobiologie liefert hier Lösungsansätze zur verteilten Datenerfassung, -verarbeitung und -speicherung. „Heutige Laufmaschinen besitzen z. B. zumeist schon eine dezentrale und hierarchische Struktur zur Verarbeitung der Sensordaten zur Erfassung der Umwelt, zur Entscheidungsfindung und zur Bewegungserzeugung, angelehnt an Strukturen des Nervensystems von Tieren.“[14]

Ein weiteres Problem ist der hohe Energieverbrauch, je mehr Beine eine Laufmaschine hat, desto mehr Servomotoren müssen angetrieben werden, die jeweils Energie benötigen.

Dem kann ein weiterer Vorteil entgegengesetzt werden. Hat eine Laufmaschine viele Beine und haben demzufolge mehr Beine als nötig Bodenkontakt, ist es weniger zeitkritisch, die in der Luft befindlichen Beine auf den Boden zu setzen. Die Beine ohne Bodenkontakt können so kompliziertere Gangmuster ausführen, z. B. das Ertasten von Hindernissen, insbesondere Löcher, die mit den anderen Sensoren evtl. nicht vermessen werden können.

### 3. Klassifizierung der Laufmaschinen

Es sind viele Ansätze denkbar, anhand deren es möglich ist, Laufmaschinen in Gruppen einzuteilen. Zum Beispiel kann man Laufmaschinen nach ihrem Einsatzgebiet oder Verwendungszweck einteilen. Der größte Teil der Literatur klassifiziert Laufmaschinen nach der Anzahl Ihrer Beine. So eine Einteilung macht aus technischer Sicht Sinn, Laufmaschinen mit gleicher Anzahl von Beinen haben in der Regel mehr Gemeinsamkeiten als Unterschiede. Die Unterschiede ergeben sich in der Regel durch die Unterschiede der als Vorbild verwendeten Tiere, was auch ein Klassifizierungskriterium sein könnte. Bei Einteilung nach Anzahl von Beinen fallen allerdings Mischformen heraus, wie z.B. das Schreitfahrwerk ALDURO [15], welches hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt wird. Im Folgenden wird anhand der Anzahl der Beine unterteilt.

#### 3.1 Zweibeinige Laufmaschinen

Vermutlich ist der Wunsch des Menschen, eine Maschine nach seinem Vorbild zu erschaffen, die Motivation, die dazu führt, dass humanoide Laufmaschinen entwickelt werden. Schauen wir beispielsweise nach Hollywood. Schon seit Jahrzehnten werden in Filmen humanoide Roboter dargestellt, die der Menschheit dienen, z. B. als Hausdiener im Film I-Robot, oder sie kämpfen für uns (Star Wars), oder gegen die Menschheit (Battlestar Galactica). Diese Beispiele belegen, dass uns humanoide Roboter schon seit Jahrzehnten faszinieren, würde die Idee nicht akzeptiert werden, könnte man mit ihrer Vermarktung nicht so viel Gewinn erwirtschaften. Demzufolge ist also hohe Akzeptanz vorhanden.

Aus technischer Sicht ist der zweibeinige Gang, unter Anderem, durch die Pendelbewegung beim Gang und die prinzipielle statische Instabilität, am kompliziertesten nachzubilden.

Als Beispiel kann an dieser Stelle die humanoide Laufmaschine Johnnie [9] herangezogen werden. Johnnie wurde vom Lehrstuhl für Angewandte Mechanik der TU-München entwickelt. Ziel war es, dass der Roboter den schnellen, dynamischen stabilen Gang beherrscht. Dynamischer Gang, wie zuvor erklärt, bedeutet, dass der Roboter nicht mitten im Gang seine Bewegung stoppen kann, da sein Schwerpunkt sich nicht immer über dem auf dem Boden stehenden Bein befindet. Man kann den zweibeinigen Gang auch als „ständig kontrolliertes Fallen“ [22] bezeichnen. Das führt dazu, dass die Maschine umkippt wenn sie mit einem Bein in der Luft gestoppt wird. Seine Fähigkeiten demonstrierte Johnnie im Jahr 2003 auf der Hannovermesse, als er einen Hindernisstrecke autonom bewältigt hat. Die Arme dienen alleine dem dynamischen Drallausgleich, um zu verhindern, dass der Roboter umkippt.



[Abb. 2]

Hier einige Fakten zu Johnnie [9][16]:

Projektdauer:	1998 - (offen)
Größe:	180 cm
Grundfläche:	40 x 80 cm
V-Max.:	2,4 Km/h
Schrittweite:	55 cm
Gewicht:	49 Kg
Angetriebene Gelenke:	17 Stück
Gelenke je Bein:	6 Stück
Steuerungscomputer:	extern
Energieversorgung:	Gleichstrom, über Kabelverbindung
Steuerungscomputer:	onboard

### 3.2 Vierbeinige Laufmaschinen

Vierbeinige Laufmaschinen sind oft von vierbeinigen Säugetieren inspiriert, wie z. B. die zuvor erwähnte Laufmaschinen Tekken, auf die unter Anderem, im Folgenden eingegangen wird.

#### 3.2.1 Anwendungen

Abgesehen vom Sony Eibo [17], der ursprünglich als Spielzeug oder Haustierersatz konzipiert war, gibt es keine Projekte, die es zum Praxiseinsatz außerhalb der Forschung gebracht haben. Und selbst die Produktion des Aibos wurde inzwischen eingestellt. Für die Forschung ist der Aibo allerdings noch sehr interessant, er wird beim Robocup eingesetzt. Die Teams können sich nur einen Vorteil durch Optimierung der Software verschaffen, was im Rahmen des Wettbewerbs zu Fortschritten in der Forschung von Steuerungssoftware und KI führt. Die meisten vierbeinigen Laufmaschinen dienen der Grundlagenforschung, sei es um neue Gangmuster, Steuerungen, Reflexreaktionen und dergleichen zu entwickeln oder zu optimieren [18]

##### 3.2.2.1 Beispiel BigDog

Eine Entwicklung der Firma Bostondynamics, mit Unterstützung der DARPA, führte zum BigDog, der auf der Webseite der Firma selbstbewußt als „The Most Advanced Quadruped Robot on Earth„ [19] angepriesen wird. Die Tatsache, dass dieses Projekt von der DARPA unterstützt wird, legt den Verdacht nahe, dass in diesem Projekt ein militärischer Nutzen vermutet wird. BigDog wirkt wie ein Lastenträger, der sich auch im schweren Gelände bewegen kann, mit einer recht großer Zuladung. Der Gang ist so stabil, so dass selbstständig Störungen von außen ausgeglichen werden können. Ein vom Hersteller veröffentlichtes Video zeigt, wie versucht wird BogDog mit einem gezielten Tritt von der



## Mobile autonome Roboter: Einführung in die Welt der Laufmaschinen

Seite zu Fall zu bringen, was BigDog ausgleichen kann, so dass es nicht zum Sturz kommt. Es können ebenfalls Steigungen im Gelände überwunden werden und Hindernisse übersprungen werden.

### **Aufbau**

Die Maße von BigDog entsprechen näherungsweise denen eines kleinen Maultieres. Die vier am Rumpf montierten Beine sind denen von Tieren nachempfunden. Abweichend dazu ist allerdings, dass ein Beinpaar vorwärts und das andere rückwärts montiert zu sein scheint. Alternativ ist es auch möglich, dass die Kniegelenke, anders als bei Tieren, größere Winkelbereiche zulassen. Damit ist gemeint, dass Bein kann in beide Richtungen gebeugt werden. Das veröffentlichte Video lässt beide Schlüsse zu, zudem gibt es mehrere Versionen und es sind kaum öffentliche Daten verfügbar.

Fakten zu BigDog [19]:

Maße	Länge: 100 cm Höhe: 70 cm Gewicht: 75 Kg
	V-Max: 3.3 MPH ( $\approx 5,28$ Km/h)
	Antrieb: Hydraulisch
Energieversorgung:	Benzinmotor (erzeugt Hydraulik-Druck)
Zuladung:	120 lbs ( $\approx 54,4$ Kg)
Steigfähigkeit:	35°
Steuerung:	Onboard



[Abb. 3]

### **Laufmuster / Kinematik**

Beobachtet man den Lauf von BigDog fällt einem als ersten auf, dass es sich um einen dynamisch stabilen Gang handelt. Das kann man daran erkennen, dass der Roboter immer in Bewegung ist, die Frequenz mit der die Beine den Boden berühren nahezu unverändert bleibt, auch wenn der Roboter sich dabei nicht oder kaum von der Stelle bewegt. Ein Laufmuster ist schwer zu erkennen, da scheinbar verschiedene Muster kombiniert wurden, und das in Verbindung mit einer Anordnung, bzw. Beweglichkeit, der Beine, wie sie in der Natur so nicht vorkommt. Das oberste Beinergelenk ähnelt von der Funktion, die es bietet, einem Kugelgelenk wie dem der menschlichen Hüfte. Damit ist es BigDog möglich, sich seitwärts und diagonal zu bewegen und sich auf der Stelle zu drehen. Solch eine Beweglichkeit erwartet man eher bei Laufmaschinen mit sechs oder mehr Beinen.

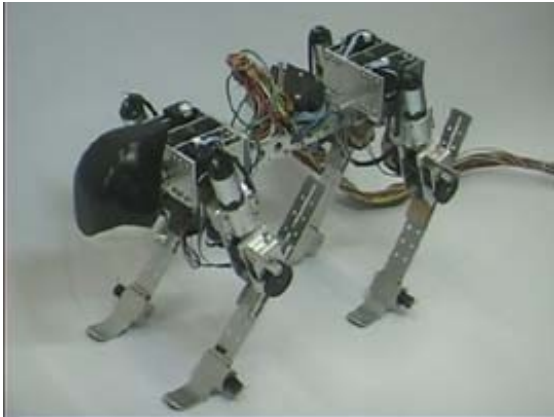
### **3.2.2.2 Beispiel Tekken IV**

Tekken IV ist die bislang letzte Evolutionsstufe des in Tokio entwickelten Tekken, der zuvor

## Mobile autonome Roboter: Einführung in die Welt der Laufmaschinen

bereits erwähnt wurde. Ziel von Tekken I war es ursprünglich den autonomen Lauf und das Rennen im Gelände zu realisieren. Tekken IV ist eine Weiterentwicklung, die im Gegensatz zu Tekken-I, keine Kabelverbindung mehr benötigt, Energieversorgung und Steuerung sind inzwischen integriert. Tekken IV ist in der Lage einem Menschen an der Leine selbstständig zu folgen, eine Art „Gassi-Geh Modus“. Des Weiteren kann er autonom an Wänden entlang gehen und dabei kleinere Hindernisse, z. B. kleine Zweige, die auf dem Boden liegen, überwinden. Als Beispiel wurde angeführt [21], dass er, wie ein Hund, autonom den Zaun eines Grundstückes entlang patrouilliert.

Tekken I und Tekken IV nebeneinander:



[Abb. 4]



[Abb. 5]

### **Aufbau**

Maße und Erscheinung von Tekken IV erinnern stark an die eines Hundes. Die Beine können, ausgehend von der Längsachse von Tekken IV, vorwärts und Rückwärts bewegt werden.

Fakten Tekken IV [21]:

Maße (LxWxH) :	55x29x25 cm
Servomotoren je Bein:	4 Stück
V-Max:	1,5 m/s
Gewicht:	9,8 Kg (inkl. Dekoration und Batterie)
Energieversorgung:	Batterie
Antrieb:	Elektrische Servomotoren
Steuerung:	onboard

### **Laufmuster / Kinematik**

Wie bei Tekken I ähnelt auch hier das Laufmuster dem eines Hundes. Ein Hund ist allerdings in der Lage, sich weitaus vielfältiger zu bewegen. Auch die Beweglichkeit von BigDog wird nicht erreicht, dazu fehlt es unter anderem an Beweglichkeit der Beine.

Eine Schrittfolge von Tekken IV läuft wie folgt ab:

Zuerst wird ein diagonal zueinander stehendes Beinpaar angehoben, die auf dem Boden stehenden Beine bewegen sich dann nach hinten und schieben so den Roboter nach vorne. Danach werden die angehobene Beine wieder auf den Boden gesetzt und das andere Beinpaar wird angehoben und nach vorne bewegt. Währenddessen wird das auf dem Boden stehende Beinpaar nach hinten bewegt und der Vorgang kann erneut starten.

### **3.3 Sechsbeinige Laufmaschinen am Beispiel von Tarry**

Das Projekt, welches die sechsbeinige Laufmaschine Tarry hervorgerichtet hat, aus der später Tarry II hervorging, wurde 1992 an der Universität Duisburg gestartet. Ziel war es, autonomes Laufen in einem Gelände mit Hindernissen zu realisieren. Im Jahre 1998 wurde begonnen, den Nachfolger von Tarry zu entwickeln, Tarry II, der stärker ausgelegt ist.

Der größte Vorteil von Tarry ist, dass eine Laufmaschine mit sechs Beinen, gegenüber Robotern mit weniger Beinen, erhöhte Stabilität gewährleistet (vgl. 3.3.3 Laufmuster). Somit ist die Konzeption von Tarry als sechsbeinige Laufmaschine zur Bewältigung der gestellten Zielsetzung in sich schlüssig.

#### **3.3.1 Anwendungen**

Anwendungen ergeben sich überall dort, wo es darum geht, autonom schweres Gelände mit Hindernisse zu durchqueren. Es kommt besonders auf die Autonomie an, wenn eine Fernsteuerung nicht möglich ist, beispielsweise in der Weltraumforschung oder wenn der Roboter auf andere Weise auf sich gestellt ist. Dies kann z. B. der Fall sein, wenn der Roboter unter Einsatzbedingungen arbeiten muss, die zu lebensfeindlich für den Menschen sind, wo es nicht möglich ist, einen steckengebliebenen Roboter zu befreien oder umzusetzen. Auch bietet sich der Einsatz an, wenn die Platzverhältnisse es nicht zulassen Menschen einzusetzen. Dazu sei das Rettungswesen als Szenario genannt [23].

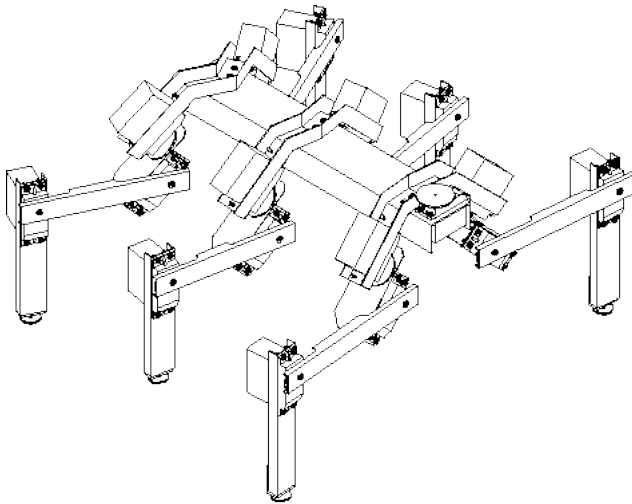
Speziell bei Tarry I & II steht keine konkrete Anwendung im Vordergrund, Focus ist die Grundlagenforschung und Gewinnung von Erkenntnissen zum Laufvorgang und dessen technischer Realisierung.

#### **3.3.2 Aufbau Tarry II**

Die Gehmaschinen Tarry I & II wurden der Stabheuschrecke nachempfunden, einem Insekt aus der Gruppe der Arthropoden. Tarry I & II besitzt, wie das Insekt, sechs symmetrisch zur Längsachse montierte Beine. Jedes Bein hat 3 Gelenke und 2 Servomotoren. Der Motor für das Gelenk, welches das Bein mit dem Torso verbindet, ist auf am Torso montiert. Bei der Entwicklung von Tarry II lag der Schwerpunkt darauf, „[...] günstige Maße zu finden, die die mechanischen Belastungen während des Betriebes so gering wie möglich halten.“ [22] Als Ergebnis erhielt man Abmessungen, deren Proportionen mit denen des Insektes vergleichbar sind. Das kann als Beleg für die Korrektheit des Konzeptes der Bionik gewertet werden.

Der Roboter besteht, einfach ausgedrückt aus sieben Baugruppen, einem Zentralkörper und sechs Beinen (vgl. Abb. 6, Abb.7).

## Mobile autonome Roboter: Einführung in die Welt der Laufmaschinen



[Abb. 6]

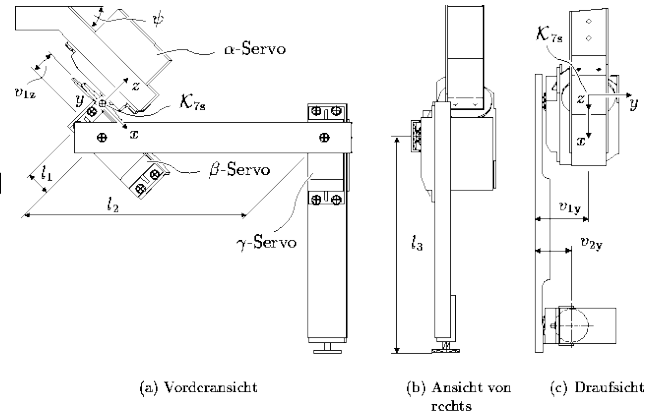


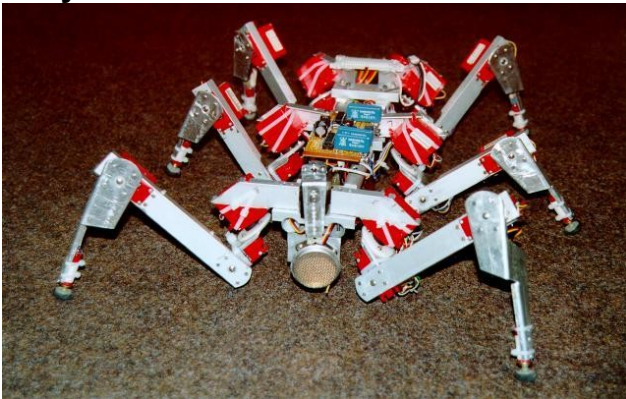
Abbildung 2: Linkes Bein der Laufmaschine in drei Ansichten

[Abb. 7]

Tarry II wird über selbstlernende Neuronale Netze gesteuert. Diese Netze sind dem Nervensystem von Tieren nachempfunden. Selbstlernende neuronale Netze müssen erst trainiert werden, bieten aber den Vorteil, dass sie später im Einsatz auf unbekannte Ereignisse flexibel aufgrund der erlernten Wissensbasis reagieren können.

Fakten [22]:

### Tarry I



[Abb. 8]

### Tarry II



[Abb. 9]

Maße (LxBxH):	50x40x18 cm	50x50x20 cm
Gewicht:	2092 g	2905 g
Nutzlast:	ca. 400 g	ca. 2900 g
Anzahl Beine:	6	6
Gelenke pro Bein:	3	3
Steuerung:	Externer PC	Neuronale Netze ( externer PC)
Versorgungsspannung:	Extern	Extern, 7 V
Sensoren:		Ultraschall, Fußpunktsensoren, Motorstromaufnahme, Neigungssensor

### 3.3.3 Laufmuster / Kinematik

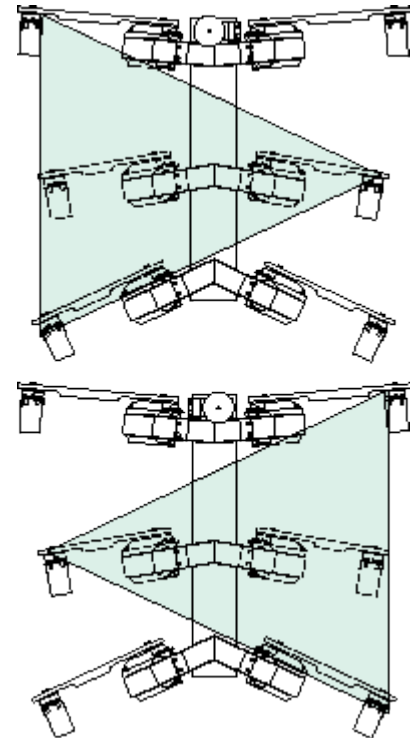
Tarry II kann sich vorwärts, rückwärts, seitwärts, und schräg zu eigenen Längsachse bewegen, also in alle Richtungen. Außerdem kann er sich auf der Stelle drehen und beliebige Kurvenradien abschreiten. Die Körperhöhe und -neigung kann verändert werden.

Dazu beherrscht Tarry II verschiedene Laufmuster. Da wäre die **Tetrapod Gangart**, die bereits am Beispiel von Tekken IV erläutert wurde. Abweichend zu Tekken, Tarry hat zwei Beine mehr, ist zu sagen, dass mit diagonal zueinander stehenden Beinen hier jeweils Vorder- und Hinterbein gemeint sind. Das mittlere Beinpaar läuft wechselseitig mit.

Ein weiteres Bewegungsmuster wäre die **Tripod Gangart**.

Dabei handelt es sich um die übliche Gangart mit sechs Beinen [22]. Dabei befinden sich drei Beine in der Luft, die anderen auf dem Boden und sorgen immer für den stabilen Stand (stabiles Dreieck [13][22]). Das sorgt dafür, dass die Bewegung jederzeit abrupt gestoppt werden kann, ohne das Tarry umkippt.

Betrachten wir das Bild zur Rechten. Man teilt die Beine in zwei Gruppen ein, die hier jeweils ein Dreieck bilden. Sind die Beine einer Gruppe abgehoben, werden sie nach vorne bewegt. Die auf dem Boden verbleibenden Beine der anderen Gruppe bewegen sich nach hinten und schieben so den Roboter nach vorne. Dann tauschen die Beine, d. h. die eine Gruppe wird abgesetzt, die andere angehoben und der Vorgang wiederholt sich. Dies ist eine komplette Schrittfolge.



[Abb. 10]

### 3.4 Achtbeinige Laufmaschinen am Beispiel von Scorpion

Mit Scorpion wurde eine achtbeiniger Roboter für schwieriges Terrain entwickelt. Als biologische Vorlage für seine Laufmuster dienten seine Namensvettern, echte Skorpione. Scorpion agiert semiautonom, das heißt, er wird ferngesteuert was die Richtung betrifft, steuert aber selbstständig die Beinbewegungen. Die Fernsteuerung erfolgt über Sichtbrille (HMD) in Verbindung mit einem Datenhandschuh und optionaler Sprachsteuerung.

#### 3.4.1 Aufbau

Scorpion besteht aus einem länglichen Torso, an dem acht Beine symmetrisch zur Längsachse montiert sind. Jedes Bein besteht aus aktiven 3 Gelenken, das heißt, Scorpion verfügt über 24 Servomotoren, die ihn antreiben. Jeder dieser Motoren wird mit einem Stromsensor überwacht. Desweiteren verfügt jedes Bein über einen Drucksensor, der ermittelt, ob ein Bein Bodenkontakt hat.

## Mobile autonome Roboter: Einführung in die Welt der Laufmaschinen

Daten Scorpion [25]:

Maße (LxBxH):	60 x 40 x 30 cm
Stromversorgung:	2x 14,4 Volt NiMH Batterien, 3,0 Ah
Gewicht: (inkl. Batterie)	10,5 Kg
Antrieb:	24 Servomotoren
V-Max:	0,3 m/s
Sensoren:	Druck, Strom, Neigung, Infrarot, Visuell (Kamera)



[Abb. 11]

### 3.4.2 Laufmuster / Kinematik

Scorpion „[...] verwendet ein biomimetisches Kontrollkonzept, welches flexibles und robustes Laufverhalten ermöglicht“ [24]. Die Steuerung basiert auf Modellen zweier biologischer Grundprinzipien, das sind zentrale Mustergeneratoren und Reflexe. Zu den übergeordneten Mustergeneratoren zählen „Rhythmic Motion Patterns (RMPs)“ [25], welche die rhythmischen Bewegungen beschreiben und steuern. Die Reflexe werden durch sogenannte „Posture Control Primitives (PCM)“ [25], die die Körperhaltung auf niedrigerer Ebene korrigieren, realisiert. Das heißt, wird aus irgendeinem Grund das vom Mustergenerator erzeugte Bewegungsmuster gestört, übernehmen die Reflexe (PCM) die Steuerung und die Störung wird so ausgeglichen. Der Roboter Scorpion kann sich omnidirektional, das heißt in alle Richtungen, bewegen. „Die Laufmuster des SCORPION Roboters basieren auf biologischen Studien an echten Skorpionen.“[24] Beschreiben lässt sich sein einfachstes Laufmuster am besten, indem man die Beine in zwei Gruppen unterteilt, die vorderen und die hinteren vier Beine jeweils in eine Gruppe und dann die Gruppen getrennt betrachtet. Die einzelnen Vierergruppen bewegen sich genau so, wie unter 3.2.2.2 beschrieben ist. Es handelt sich um das gleiche Laufmuster wie bei Tekken IV, nur mit dem Unterschied, dass hinter den vorderen vier Beinen vier weitere folgen, die sich nach dem gleichen Muster bewegen.

### 3.4.3 Anwendungen

Scorpion soll dazu eingesetzt werden, schwer zugängliche oder gefährliche Areale zu erkunden. Der Einsatz kann im Rettungswesen, insbesondere SAR-Einsätze und nach Katastrophen, erfolgen. Eine amphibische Variante befindet sich in der Entwicklung, damit sollen weitere Einsatzfelder erschlossen werden. Auch Minensuche stellt ein Einsatzszenario dar.

Momentan testet die NASA mit einer Kopie von Scorpion die Vorteile eines Laufroboters

## Mobile autonome Roboter: Einführung in die Welt der Laufmaschinen

für den extraterrestrische Einsatz aus. Scorpion soll, laut NASA, geeignet sein, auf dem Mars Gebiete erreichen können, die für radgetriebene Roboter unzugänglich sind [25]. Problematisch ist momentan noch die Energieversorgung, der Roboter ist zu klein um viel gespeicherte Energie mitzuführen. Das steht einer Mission für die NASA momentan noch im Weg.

### 4. Produkte

Serienreife Produkte befinden sich zur Zeit nicht auf dem Markt, allenfalls gibt es Prototypen. Bis 2006 gab es noch den Sony Aibo [17], dessen Produktion wurde nach 150.000 verkauften Exemplaren unerwartet eingestellt. Der in dieser Ausarbeitung vorgestellte Tekken IV erinnert, wie er auf der Aichi Expo ausgestellt wurde, einem Hund und könnte als Haustierersatz dienen, was ursprünglich der Aibo auch leisten sollte. Im Gegensatz zu seinen Vorgängern wurde Tekken IV auf die Optik eines Hundes getrimmt, bis hin zu einem abnehmbaren Stummelschwanz als Zubehör.

### 5. Ausblick

Momentan befindet sich die Entwicklung von Laufmaschinen noch in den Kinderschuhen, und das, obwohl in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht worden sind. Wegen rasanter Fortschritte in der Entwicklung neuer Akkutechniken kann davon ausgegangen werden, dass über kurz oder lang, das Problem der Energieversorgung von Laufmaschinen gelöst wird. Die Brennstoffzellentechnik bietet da weiteres Potential.

Die Erkenntnisse, die durch Forschung auf dem Gebiet der Robotik gewonnen werden, oft handelt es sich noch um Grundlagenforschung, können uns auch auf weiteren Gebieten bereichern. Ein Prinzip der Bionik ist es nicht nur die Natur zu kopieren und technisch nachzubilden, es folgt auch eine Rückportierung zum biologischen Objekt. [14] Diese Rückportierung kann sich beispielsweise bei der Entwicklung besserer Prothesen als Vorteilhaft erweisen. Naheliegend ist die Entwicklung von Beinprothesen aufgrund erzielter Ergebnisse bei der Erforschung von Laufverhalten und Entwicklung von Laufmaschinen.

Zur Zeit wird daran gearbeitet, Laufmaschinen auf fremden Himmelskörpern einzusetzen, da gibt es, wie z. B. Scorpion, konkrete Projekte. Bis jetzt waren die Fahrzeuge auf Mars und Mond radgetrieben, das kann sich in Zukunft ändern. Laufmaschinen können Gebiete erreichen, die wegen der Geländebeschaffenheit für Radfahrzeuge unerreichbar sind.

Auch die Erschließung von Landschaften auf der Erde wäre ein denkbare Szenario für den Einsatz von Laufmaschinen. Setzt man Laufmaschinen ein, kann man in Zukunft vielleicht darauf verzichten, teure Infrastruktur (Straße, Schiene, etc.) bauen zu müssen.

Zuletzt wäre da noch das selbst gewählte Ziel des Robocup zu erwähnen, demnach soll im Jahr 2050 eine humanoide Robotermannschaft den dann amtierenden Fußballweltmeister schlagen. Ob das jemals geschieht, technisch ist es bestimmt irgendwann realisierbar, bleibt abzuwarten. Stellt sich nur die Frage, ob das auch wünschenswert ist.

## 8. Glossar

- Arthropoden
- biomimetisch: siehe bionisch
- bionisch: von der Natur inspiriert und dann technisch umgesetzt
- DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency, Agentur des U.S. Amerikanischen Verteidigungsministeriums
- Exoskeletts: Außenskelett, der Panzer ist das Skelett.
- Extraterrestrisch: wörtlich ausserirdisch, in der Astronomie Himmelskörper außerhalb der Atmosphäre der Erde
- HMD: Helmet Mounted Display
- humanoide: Menschenähnlich
- KI: künstliche Intelligenz
- Kinematik: Lehre von der Bewegung von Punkten und Körpern im Raum
- Lokomotion: Fortbewegung
- Prothese: künstliches Gliedmaß oder Gelenk für den Menschen
- rezent: Momentan existierende oder erst kürzliuch ausgestorbene Tierart
- SAR: im Rettungswesen: Search And Rescue
- Servo: Kurzform, siehe Servomotor
- Servomotor: Motor, der vorgebbare Positionen einstellt und halten kann, auch bei Gegenkraft, elektisch oder hydraulisch betrieben

## 9. Quellen

- [1] Wikipedia: Autonome mobile Roboter  
[http://de.wikipedia.org/wiki/Autonome\\_mobile\\_Roboter](http://de.wikipedia.org/wiki/Autonome_mobile_Roboter) . 2.12.2007,  
Abruf am 28.12.2007
- [2] Wikipedia: Arthropoden  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Arthropoden> , 08.01.2008  
Abruf am 10.01.2008
- [3] Blickhan, R.; Petkum, S.; Weihmann , T.; Karner, M. : Schnelle Bewegung bei Arthropoden - Strategien und Mechanismen  
In: Pfeiffer, F.; Cruse H. (Hrsg.) : Autonomes Laufen, Springer Verlag, 2005, Seite 19-45
- [4] Wikipedia: Laufroboter, 7.12.2007  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Laufroboter>  
Abruf am 20.12.2007
- [5] Dillmann, R.: Eine vierbeinige Laufmaschine mit dynamisch stabilen Gang  
In: Pfeiffer, F.; Cruse H. (Hrsg.) : Autonomes Laufen, Springer Verlag, 2005, Seite 175-189



## Mobile autonome Roboter: Einführung in die Welt der Laufmaschinen

- [6] Forschungszentrum Informatik IDS: LAURON läuft und klettert in Schul- und Wissensbüchern  
<http://www.fzi.de/ids/2214.html>  
Abruf: Dezember 2007
- [7] The Walking Machine Catalogue  
<http://www.walking-machines.org/>  
Abruf: November 2007
- [8] Holzfäller-Roboter  
<http://rollmops.wordpress.com/2006/08/08/holzfaeller-roboter/>  
Aufruf: November 2007
- [9] Lehrstuhl für angewandte Mechanik , TU-München: Laufmaschine Johnnie,  
<http://www.amm.mw.tu-muenchen.de/index.php?id=182>  
Abruf: Januar 2008.
- [10] Sebastian Uhlmann: Laufroboter  
<http://www-user.tu-chemnitz.de/~stj/lehre/prosem05/lauf.pdf>  
dfs
- [11] KIMURA Lab  
<http://www.kimura.is.uec.ac.jp/research/Quadruped/photo-movie-e.html>  
Abruf: Januar 2008
- [12] Fischer, M. S., Witte, H.: Kinematisches Modell und Dynamiksimulation vierbeinigen Laufens von Säugetieren  
In: Pfeiffer, F.; Cruse H. (Hrsg.) : Autonomes Laufen, Springer Verlag, 2005, Seite 202-223
- [13] Weichert, F.: Insekten  
[http://www.tu-ilmeneau.de/fakmb/uploads/media/Insekten\\_als\\_Vorbild\\_fuer\\_Laufroboter.pdf](http://www.tu-ilmeneau.de/fakmb/uploads/media/Insekten_als_Vorbild_fuer_Laufroboter.pdf)  
13.03.2007, Abruf: Dezember 2007
- [14] Fakultät Maschinenbau BLOKON, TU-Ilmenau: Kompetenz: Bionisch Inspirierte Robotik  
<http://www.tu-ilmeneau.de/fakmb/Bionisch-Inspirierte.3631.0.html>  
Abruf: 03.01.2008
- [15] Hiller, M.: Autonomes hydraulisch angetriebenes Schreitfahrwerk ALDURO  
In: Pfeiffer, F.; Cruse H. (Hrsg.) : Autonomes Laufen, Springer Verlag, 2005, Seite 191-200
- [16] KIMURA Lab Japan: Biologically Inspired Adaptive Control of the Quadruped on Irregular Terrain, 12.03.2004  
<http://www.kimura.is.uec.ac.jp/research/Quadruped/photo-movie-e.html>  
Abruf: Dezember 2007
- [17] Sony Aibo Europe: Official Website  
<http://support.sony-europe.com/aibo/>  
Abruf: Dezember 2007
- [18] Dillmann, R.: Rechnerarchitektur, Sensorik und adaptive Steuerung einer vierbeinigen Laufmaschine mit dynamisch stabilen Gang.

## Mobile autonome Roboter: Einführung in die Welt der Laufmaschinen

In: Pfeiffer, F.; Cruse H. (Hrsg.) : Autonomes Laufen, Springer Verlag, 2005, Seite 176-199

- [19] BostonDynamics: BigDog: The Most Advanced Quadruped Robot on Earth  
<http://www.bostondynamics.com/content/sec.php?section=BigDog>  
Abruf: Januar 2008
- [20] KIMURA Lab.: The Quadruped Robot "Tekken1", 10.02.2004  
<http://www.kimura.is.uec.ac.jp/research/Quadruped/photo-movie-tekken-e.html>  
Abruf: Dezember 2007
- [21] KIMURA Lab.: Tekken IV, 18.06.2005  
<http://www.kimura.is.uec.ac.jp/research/Quadruped/photo-movie-tekken4-e.html>  
Abruf: Dezember 2007
- [22] Buschmann A., Guddat, M., Losch, D. C.: Homepage der Tarry Gehmaschinen  
<http://www.tarry.de/>  
Abruf: Dezember 2007
- [23] Project Rescue Robotics: Laufroboter in Katastrophenszenarien  
<http://rescuerobotics.informatik.uni-bremen.de/de-1-0.html>  
Abruf Januar 2008
- [24] Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz- Labor Bremen:  
Scorpion- Ein Biomimetischer Laufroboter, 14.11.2007  
<http://www.dfki-bremen.de/robotik/forschung/systeme/weltraumrobotik/scorpion/>  
Abruf: Dezember 2007
- [25] Rhombos Verlag:  
Skorpion-Roboter aus Bremen soll ferne Planeten erforschen, 12.02.2005  
<http://www.rhombos.de/shop/a/show/story/?66&PHPSESSID=865da4935f1906038c97e2ee97d16dfb>  
Abruf: Januar 2008

## 10. Bildverzeichnis

- [Abb 1]: Typische Versuchssituationen zur Videoanalyse von Laufmustern, [12]
- [Abb. 2]: Die Laufmaschine Johnnie, laufend im Profil, [9]
- [Abb. 3]: Die Vierbeinige Laufmaschine BigDog, [19]
- [Abb. 4]: Vierbeiniger Laufroboter Tekken I, [20]
- [Abb. 5]: Vierbeiniger Laufroboter Tekken IV, [21]
- [Abb. 6]: CAD\_Modell der Laufmaschine Tarry II, [22]
- [Abb. 7]: Ein linkes Bein der Laufmaschine Tarry II in drei Ansichten, [22]
- [Abb. 8]: Tarry I, [22]
- [Abb. 9]: Tarry II, [22]
- [Abb. 10]: Schemazeichnung: Tripod Gangart, [22]
- [Abb. 11]: Laufmaschine Scorpion, [24]