Autonome, adaptive Bewegungskoordination von Gehmaschinen in komplexer Umgebung

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der
Gerhard-Mercator-Universität–Gesamthochschule Duisburg
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Martin Guddat
aus
Oberhausen/Rheinland

Referent: Prof. Dr.-Ing. Martin Frik
Korreferent: Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Hartmut Witte
Tag der mündlichen Prüfung: 15. Februar 2002

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau, Lehrstuhl für Mechanik an der Gerhard-Mercator-Universität in Duisburg.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Frik, der diese Arbeit als Referent betreut hat. Seine Förderung, sowohl durch seine guten Ratschläge und Hinweise, besonders aber durch das Vertrauen, das er in mich gesetzt hat, hat mir immer geholfen und mich vorangebracht.

Herrn Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Hartmut Witte als externem Gutachter danke ich für die Übernahme des Korreferates sowie für die vielen erhellenden Diskussionen auf Konferenzen und Veranstaltungen insbesondere des DFG-Schwerpunktprogrammes „Autonomes Laufen“

Den Mitarbeitern des Fachgebietes Mechanik gebührt besonderer Dank für das außergewöhnlich gute Arbeitsklima und die ständige Hilfsbereitschaft der Kollegen. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle Herrn Dr.-Ing. Axel Buschmann, dessen beherztes Eingreifen mich nach meiner Studienzeit an das Fachgebiet gebunden hat.

Herausgestellt werden soll hier Herr Dipl.-Ing. Eko Bono Suprijadi. Ohne seinen unermüdlichen Einsatz, seine Arbeit an den Robotern und seine Hilfsbereitschaft wäre meine Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Zusätzlich haben viele Studenten durch ihre Mitarbeit und ihre Studien- und Diplomarbeiten geholfen, TARRY und seine Nachfolger weiter zu verbessern. Ich hoffe, dass alle dabei so viel Spass hatten wie ich selbst.

Für den notwendigen Rückhalt verdient meine Lebensgefährtin Kerstin Daniel besonderen Dank. Ihre permanente Unterstützung hat mich auch in schwierigen Zeiten getragen.

Widmen möchte ich diese Arbeit meinen Eltern, Rainer und Karola Guddat.

Mülheim an der Ruhr im Dezember 2002

Martin Guddat

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung **1**

1.1 Einordnung existierender Koordinationsmechanismen 2

1.1.1 Katharina 4

1.1.2 TUM 5

1.1.3 Lauron 6

1.1.4 Zusammenfassung der Koordinationsmechanismen 7

1.1.5 Weitere existierende Gehmaschinen 7

1.2 Inhalt und Ziel der Arbeit 9

2 Aufbau, Aktorik und Sensorik **11**

2.1 Mechanischer Aufbau 11

2.1.1 Prinzipieller Aufbau 12

2.1.2 Koordinatensysteme 14

2.2 Die ausgeführten Gehmaschinen 15

2.2.1 Tarry I 15

2.2.2 Tarry II 17

2.2.3 Tarry IIa 19

2.3 Elemente der Aktorik und Sensorik 21

2.3.1 Servomotoren 21

2.3.2 Aufstandssensor 27

2.3.3 Dehnungsmeßstreifen 28

2.3.4 Inklinometer 29

2.3.5 Ultraschallsensor 32

3 Kommunikation der Komponenten **34**

3.1 Beteiligte Hardwarekomponenten 36

3.1.1 Digital-I/O 37

3.1.2 PWM-Generator 37

3.1.3 A/D-Wandler 38

3.2 Kommunikation der Rechner mit den Hardwarekomponenten 38

3.3 Kommunikation mit den Diensten 40

4 Grundlagen der Gangerzeugung 43
4.1 Gangerzeugung mit der WalkingLib . . . 43
4.2 Erzeugte Gangmuster . . . 45
4.3 Ganggenerierung mit neuronalen Netzen . . . 48
4.4 Neuronale Netze zur Erzeugung der Stellwinkel . . . 52
4.5 Schrittmacher . . . 53
4.6 Lern- und Generalisierungsmuster . . . 54
4.7 Training und Genauigkeit der Netzwerke . . . 56
4.8 Geschwindigkeitsvergleich . . . 60

5 Adaptive Bewegungskoordination 62
5.1 Das Koordinationskonzept der Gehmaschine . . . 62
5.2 Künstliche Reflexe . . . 65
5.2.1 Aufstandsreflex . . . 65
5.2.2 Lagekorrektur . . . 68
5.2.3 Levator-Reflex . . . 73
5.2.4 Rückführungsreflex . . . 74
5.3 Planende Module . . . 75
5.3.1 Umgehung großer Hindernisse . . . 75
5.3.2 Umgebungskarte . . . 78

6 Experimentelle Überprüfung 84
6.1 Fortbewegung in der Ebene . . . 84
6.2 Fortbewegung in leicht unstrukturiertem Gelände . . . 84
6.3 Fortbewegung im Gelände mit Hindernissen . . . 85
6.4 Hindernisbewältigung mit interner Karte . . . 86
6.5 Überschreiten einer Wippe . . . 87
6.6 Verhalten an einer Kante . . . 87
6.7 Ausweichbewegung vor einer Wand . . . 88
6.8 Ausweichbewegung in einem Korridor . . . 88

7 Zusammenfassung und Ausblick 97

Literaturverzeichnis 99

Formelzeichen und Abkürzungen

a_x	Abstand des Fußaufstandpunktes vom $\mathcal{K}_r$-System in ${}^r y$-Richtung
b_y	Abstand des Fußaufstandpunktes der vorderen Beine in ${}^r x$-Richtung vom Ursprung des $\mathcal{K}_r$ Systems
c_y	Abstand des Fußaufstandpunktes der hinteren Beine in ${}^r x$-Richtung vom Ursprung des $\mathcal{K}_r$ Systems
c_{Schall}	Schallgeschwindigkeit im Medium
E	absoluter Lernfehler
$\overline{E}$	bezogener Lernfehler
g	Erdbeschleunigung
G	absoluter Generalisierungsfehler
$\overline{G}$	bezogener Generalisierungsfehler
h	Eingangswert eines neuronalen Netzes zur Festlegung der lokalen Beinhöhe
h_{l}	Maximaler senkrechter Abstand des Fußpunktes über der Aufstandsebene
h_{r}	Senkrechter Abstand des Zentralkörperbezugspunktes über der Aufstandsebene
HL	Kurzbezeichnung und Index für das hintere linke Bein
HR	Kurzbezeichnung und Index für das hintere rechte Bein
$\mathbf{i}$	Vektor der Eingangswerte (Inputunits) eines Netzwerkes
i, j, k	Zähl-/ Indexvariablen
$\mathcal{K}_i$	Koordinatensystem i
l_i	Länge des i-ten Beinsegmentes
l, m	Zähl-/ Indexvariablen
ML	Kurzbezeichnung und Index für das mittlere linke Bein
MR	Kurzbezeichnung und Index für das mittlere rechte Bein
$\boldsymbol{p}_i$	Ortsvektor zum Punkt P_i
p	Anzahl der Lernmuster
q	Anzahl der Generalisierungsmuster
${}^i_{\text{A}}\boldsymbol{r}_{\text{B}}$	Vektor vom Punkt A zum Punkt B zerlegt in Koordinaten des Systems i
R	molare Gaskontante
s	Hindernisentfernung
s_j	Verschiebung des Schwingungsmittelpunktes des Beinpaares j
$\mathbf{t}$	Vektor der Ausgangswerte (Outputunits) eines Netzwerkes
t	Zeit
Δt	Zeitdifferenz
${}^j\boldsymbol{T}_i$	Transformationsmatrix vom System i in das System j
T	Temperatur
T	Zyklusdauer (Schrittdauer)

v_{x}	Geschwindigkeit des Zentralkörpers in Längsrichtung
v_{y}	Geschwindigkeit des Zentralkörpers in Querrichtung
VL	Kurzbezeichnung und Index für das vordere linke Bein
VR	Kurzbezeichnung und Index für das vordere rechte Bein
w_j	Schrittbreite des Beinpaares j
x, y, z	kartesische Koordinaten-Richtungen
$\dot{x}$	Eingangswert eines neuronalen Netzes zur Festlegung der Geschwindigkeit in ${}^{r}x$-Richtung
Δx	Amplitude der überlagerten Zentralkörperschwingung (Längs)
$\dot{y}$	Eingangswert eines neuronalen Netzes zur Festlegung der Geschwindigkeit in ${}^{r}y$-Richtung
Δy	Amplitude der überlagerten Zentralkörperschwingung (Quer)

α	Stellwinkel des Gelenkes zwischen Zentralkörper und *Coxa*-Element
α_{x}	Neigungswinkel des Zentralkörpers um Längsachse (Rollen)
α_{y}	Neigungswinkel des Zentralkörpers um die Querachse (Nicken)
β	Stellwinkel des Gelenkes zwischen *Coxa*- und *Femur*-Element
β_i	Duty-Faktor des i-ten Beines
γ	Stellwinkel des Gelenkes zwischen *Femur*- und *Tibia*-Element
η	Neigungswinkel um die ${}^{r}y$-Achse
θ	Motorstellwinkel
κ	Isentropenexponent
μ	Anzahl der Eingangsunits eines Netzwerkes
ν	Anzahl der Ausgangsunits eines Netzwerkes
ξ	Neigungswinkel um die ${}^{r}x$-Achse
ϕ_i	Phase des Beines i
φ, ψ	Winkel zur Drehung vom k- in das c-System
φ	Drehwinkel der Maschine relativ zur ${}^{i}x$-Achse
φ_{ges}	Öffnungswinkel des Ultraschallkegels
$\varphi_{\mathrm{min\|max}}$	Kegelöffnungswinkel
φ_{x}	Phasenverschiebung der überlagerten Schwingung (Längs)
φ_{y}	Phasenverschiebung der überlagerten Schwingung (Quer)
ω	Eingangswert eines neuronalen Netzes zur Festlegung der Rotationsgeschwindigkeit um die Hochachse
ω_{z}	Rotationsgeschwindigkeit um die Hochachse der Maschine

Bei einer Doppelbelegung geht die Bedeutung aus dem Kontext hervor.

1 Einführung

Der Mensch hat sich im Laufe seiner Entwicklung eine immer größere Mobilität ermöglicht. Neben der Entwicklung der mechanischen Fortbewegungsmittel war insbesondere der Bau von einfachen Wegen, die Verlegung von Eisenbahnschienen und der Bau von Straßen, Brücken, Kanälen und Autobahnen dafür verantwortlich. Die Verwendung von Fahrzeugen, die einen präparierten Fahrweg benötigen, stößt allerdings in vielen Fällen an Grenzen. Oft ist es wirtschaftlich oder ökologisch nicht sinnvoll oder möglich, die notwendige Infrastruktur zu errichten. Dies ist in der Regel der Fall, wenn das Ziel nur selten oder im Extremfall auch nur einmalig erreicht werden soll, oder wenn andere Faktoren wie hohe laterale Schäden dagegen sprechen. Dies ist zum Beispiel bei Forst- oder Gebirgsarbeiten der Fall. Zusätzlich ist in vielen Fällen die Zeit, die notwendig ist, einen entsprechenden Weg vorzubereiten, nicht vorhanden. Diese Situation tritt beispielsweise bei Unfällen oder Naturkatastrophen auf. Herkömmliche landgestütze Fortbewegungsmittel die keine vorbereiteten Wege benötigen, wie Kettenfahrzeuge, sind auch nur begrenzt geländegängig und widersprechen regelmäßig den ökologischen Anforderungen, da sie den Fahrweg sehr stark verdichten und schädigen.

Als Abhilfe bieten sich gehende Mechanismen an. Die Natur hat eindrucksvoll gezeigt, daß gehende Lebewesen praktisch jeden Punkt auf den Landmassen der Erde erreichen können. Die gehende Fortbewegung zeichnet sich durch ihre extrem große Flexibilität aus. Kleinere Unebenheiten werden direkt ausgeglichen, Hindernisse können umgangen, überstiegen oder erklommen werden. Da lediglich diskrete Aufstandspunkte für die Lokomotion notwendig sind, sind die Anforderungen an den Untergrund weitaus geringer als bei rollenden Fahrzeugen, die kontinuierliche Verhältnisse verlangen.

Die erhöhte Flexibilität von Gehmaschinen wird allerdings durch eine deutlich erschwerte Steuerung erkauft. Die komplexen Mechanismen müssen, um die oben beschriebenen Vorteile bieten zu können, über eine hohe Anzahl an mechanischen Freiheitsgraden verfügen.

Um auf mittelfristige Sicht eine wirtschaftliche Nutzung solcher Maschinen zu ermöglichen, ist es notwendig, eine hinreichend einfache Bedienung zu garantieren. Dies bedeutet, daß die Maschine in der Lage sein muß, sich in unbekanntem Gelände praktisch autonom fortzubewegen. Das Wort autonom leitet sich ab vom griechischen *αὐτόνομος* das in [Ben90] als

> „nach eigenen Gesetzen lebend, nach eigener Wahl, unabhängig, bes. politisch selbständig“

interpretiert wird.

Die Maschine muß also auf die groben Vorgaben eines Bedieners, der beispielsweise eine Richtung oder einen Zielpunkt angibt, reagieren, indem sie die dazu notwendige Gelenkkoordination und Überwindung eventueller Hindernisse selbständig übernimmt. Ebenso muß die Maschine in der Lage sein, gefährliche Situationen, beispielsweise Instabilität, zu erkennen und zu verhindern oder zumindest darauf hinzuweisen.

Um all diese Anforderungen zu erfüllen, bietet es sich an, bei der Entwicklung solcher Maschinen Vorbilder aus der Natur als Modell zu verwenden. Im Verlaufe der Evolution haben sich dort Verhaltensweisen entwickelt, die die oben angesprochenen erforderlichen Eigenschaften beinhalten.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Maschinen sind Sechsbeiner. Als Modell diente die Stabheuschrecke *Carausius morosus*. Insbesondere stellen sechsbeinige Mechanismen einen guten Kompromiß aus statischer Stabilität während der Bewegung und dem notwendigen Koordinationsaufwand, der sich aus der Anzahl der Gelenke ergibt, dar.

Bei der Beobachtung und Analyse der Bewegungsabläufe der Vorbilder aus der Natur steht die technische Nutzung der Maschine im Vordergrund. Eine sogenannte *Biomimikry*, die die Verhaltensweisen eines Tieres lediglich nachahmt, ohne deren Nutzen zu erkennen oder zu hinterfragen wäre kontraproduktiv. Wie schon in einer Arbeit von PIEKENBROCK [Pie96] angemerkt, ist zu fordern, daß

> „... die Ergebnisse der biologischen Forschung als Anregung genommen werden. Die Implementierung muß jedoch berücksichtigen, daß die Steuerung für eine *technische* Laufmaschine geeignet sein muß, die über eine andere Antriebstechnik und Sensorik verfügt als eine Stabheuschrecke."

Um die bisher verfolgten Lösungsansätze für diese Problematik darzustellen, sollen die grundsätzlichen bisher verwendeten Möglichkeiten zur Bewegungskoordination bei Gehmaschinen im folgenden Abschnitt exemplarisch präsentiert werden.

1.1 Einordnung existierender Koordinationsmechanismen

Bei der Bewegungskoordination von Gehmaschinen greifen verschiedene Probleme ineinander. Neben der Konstruktion und Verschaltung der Maschinenstruktur, der Aktoren und der Sensoren sind die eigentlichen Koordinationsaufgaben zu lösen. Dies beinhaltet zuallererst die Ansteuerung der Aktoren und die Meßwerterfassung der Sensorik. Auf diesen Funktionen aufsetzend folgt die eigentliche Bewegungskoordination.

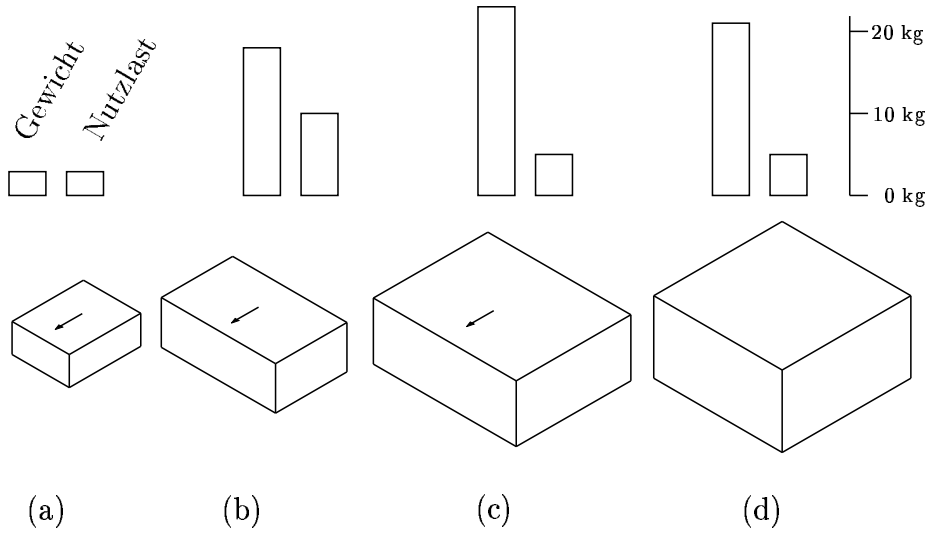


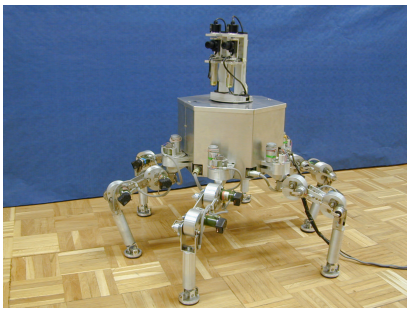
Abbildung 1: Gewicht, Nutzlast und Ausmaße der Maschinen (a) TARRY II, (b) LAURON III, (c) TUM und (d) KATHARINA im Vergleich

Für alle Elemente dieses Zusammenspiels sind verschiedene Ansätze möglich und auch gebräuchlich. Die Palette der eingesetzten Strategien reicht dabei von Konzepten aus der klassischen Robotik bis hin zu stark biologisch inspirierten Modellen. Dazwischen treten etliche Mischformen auf.

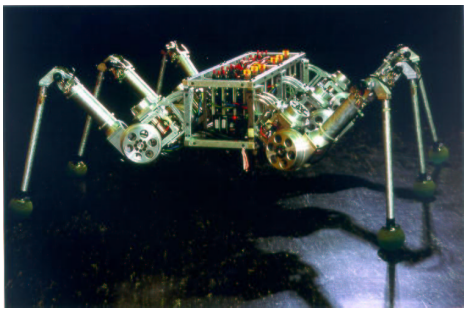
Dabei finden auch in Deutschland alle praktisch eingesetzten Methoden Verwendung. Anhand der sechsbeinigen Gehmaschinen KATAHRINA, TUM und LAURON sollen die einzelnen Koordinationsprinzipien kurz angesprochen werden. Damit wird es möglich sein, das im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellte Konzept zur Steuerung der Gehmaschine TARRY besser einzuordnen.

Die äußere Form der beschriebenen Maschinen ist in zwei der drei Fälle insektenartig. Lediglich für KATHARINA, die mit den Methoden der klassischen Robotik arbeitet, wurde auch eine entsprechende äußere Form gewählt. Dieser Sechsbeiner hat einen rotationssymmetrischen Aufbau und findet damit kein entsprechendes Gegenstück in der Natur. Bedingt durch diese Konstruktion hat die Maschine keine Vorzugs- oder Vorwärtsrichtung.

Die Ausmaße der Maschinen, deren Eigengewicht und Tragfähigkeit nach [Ber01] werden in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Beim Vergleich ist zu beachten, daß die vertretenen Maschinen unterschiedliche Stadien der Energie- und Prozessorautonomie repräsentieren. Das Verhältnis von Eigengewicht zu Nutzlast dient nur der Übersicht und kann nicht direkt zwischen den Maschinen verglichen werden.



(a)



(b)

Abbildung 2: Die Gehmaschinen KATHARINA (a) und TUM (b)

1.1.1 Katharina

Wie oben erwähnt, handelt es sich bei der Gehmaschine KATHARINA um eine Konstruktion aus dem Bereich der klassischen Robotik. Die Maschine ist am Fraunhofer Institut in Magdeburg in der Arbeitsgruppe von Dr. Schmucker entwickelt worden, wobei einzelne Konzepte auf Arbeiten an der Gehmaschine MASHA [DGG+83] zurückgehen. KATHARINA ist konzipiert, um mit einem montierten Werkzeug zum Einsatzort zu gelangen und dort bestimmte Arbeiten durchzuführen [SSI96]. Die sechs Beine mit je drei Freiheitsgraden sind gleichmäßig am Korpus des sechskantigen prismatischen Grundkörpers angebracht.

Die Koordination der Beine erfolgt über eine hierarchische Organisation von Microcontrollern, bei der ein zentraler Controller die sechs Beincontroller steuert. Jedes Bein enthält einen 3-Komponenten Kraftsensor, mit dessen Hilfe eine Kraftrückführung erreicht wird.

Zum Aufgabenspektrum der Gehmaschine KATHARINA gehört nicht, sich in unbekanntem Gelände autonom zu bewegen. Daher sind auch keine speziellen Mechanismen zur Hinderniserkennung etc. vorhanden. Vielmehr soll, unter anderem mit der Hilfe der am Körper angebrachten Stereokamera, eine Plattform zur Verfügung gestellt werden, die es einem Operator erlaubt, die Maschine zu einem Arbeitsort zu manövrieren und dort einzusetzen. Dies schließt durch die Kraftregelung auch den Einsatz auf nachgiebigen Untergründen mit ein.

Bei der Konzeption und der Steuerung der Maschine werden die Konzepte der klassischen Robotik auf einen Sechsbeiner angewendet. Die verwendeten Methoden zielen darauf ab, die Kraftrückführung und Positionierung auf diese speziellen Gegebenheiten anzuwenden. Dies erfordert insbesondere die Bestimmung von physikalischen Parametern der Maschine, wie beispielsweise Massen und Steifigkeiten. Diese Parameter sind notwendig, um die Gleichungssysteme, die sich aus den regelungstechnischen Aspekten der Kraftadaptivität ergeben, zu lösen. Der rechnerische Aufwand

bei Anwendung dieser Methode ist hoch. Die Maschine ist aber allein mit diesem Verfahren nicht in der Lage, wirklich autonom in unbekanntem Gelände zu agieren.

1.1.2 TUM

Dem Ansatz von KATHARINA steht das Konzept der Gehmaschine TUM des Instituts B für Mechanik der Technischen Universität München gegenüber, die in der Arbeitsgruppe von Prof. Pfeiffer entstanden ist. Hier wird ein weitgehend der Stabheuschrecke *Carausius morosus* (siehe auch Kapitel 2) nachempfundener Roboter mit Hilfe dezentraler, der Biologie entlehnter, Mechanismen gesteuert.

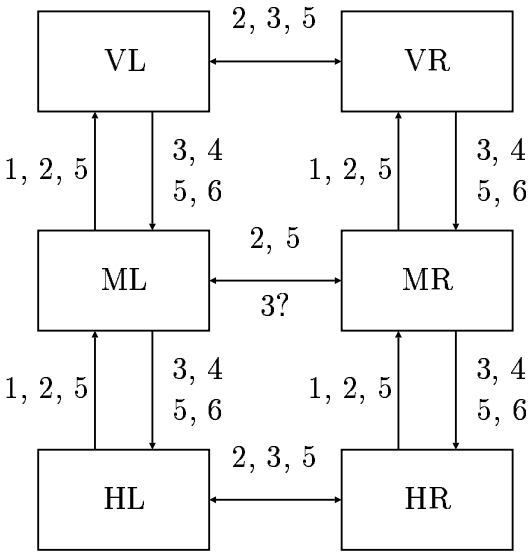
Die dreisegmentigen Beine, deren Segmente alle die gleiche Länge haben, sind in der gleichen Orientierung wie bei der Stabheuschrecke am Zentralkörper angebracht. Die Längenverhältnisse der einzelnen Segmente stimmen annähernd mit denen des Vorbilds überein. Die Hüftbreiten der Maschine sind für alle drei Beinpaare identisch. Die Maschine wird angetrieben von Gleichstrommotoren, die teilweise mit „Harmonic Drive"-Getrieben untersetzt werden. Das dritte Segment der Beine ist jeweils mit Dehnungsmeßstreifen ausgestattet. Die Enden dieser Segmente besitzen einen Kontaktsensor, um das Aufsetzen der Beine feststellen zu können.

Der stark an das Beispiel aus der Biologie angelehnte Aufbau der Maschine geht mit einem entsprechend biologisch motivierten Koordinationsansatz einher. Dessen Mechanismen stützen sich dabei auf die in [CBD+95] gegebenen Regeln, die die Kommunikation zwischen den Einzelbeinen und deren excitatorischen (anregende) und inhibitorischen (dämpfende) Wirkung bestimmen. Diese Regeln sind in Abbildung 3 dargestellt.

Die Architektur dieses Systems, die ursprünglich in drei Schichten [Wei93] geplant und danach auf vier Schichten [SP98] erweitert wurde, sieht eine starke Autonomie der einzelnen Beine vor. Durch den Austausch von Informationen zwischen den contralateralen und ipsilateralen Beinen wird ein Großteil der notwendigen Kontrolle bereits in den unteren Ebenen veranlaßt. Die oberste, vierte Ebene, dient lediglich dazu, die Vorwärtsgeschwindigkeiten des Zentralkörpers und die Drehgeschwindigkeit um die Hochachse, beispielsweise durch die Unterstützung eines Kamerasystems, vorzugeben.

Dieser sehr biologische Ansatz hat den Vorteil, einen Großteil der Koordinationsaufgaben in den unteren Schichten der Kontrollarchitektur zu bearbeiten. Es stellt sich aber die Frage, ob es möglich und sinnvoll ist, für Gangarten, die zwar nicht in der Natur beobachtet werden, die aber dennoch erwünscht sind, ebensolche Regeln selber zu entwerfen.

Ebenso berücksichtigt dieser Ansatz nur wenig, daß Verhaltensweisen, die für das ähnlich organisierte Vorbild sinnvoll oder akzeptabel sind, für Maschinen keine geeignete Lösung darstellen. In Fragen der Kippstabilität etc. wird eine Instanz sinnvoll, die zentrale Vorgaben für alle Beine machen kann.



1. Schwingbewegung verhindert den Start einer weiteren Schwingbewegung
2. Beginn einer Stemmbewegung regt den Beginn einer Schwingbewegung an
3. Caudale Positionen regen den Beginn einer Schwingbewegung an
4. Position beeinflußt das Ziel der Schwingbewegung
5. Erhöhter Widerstand bewirkt größere Kraft (Mitaktivierung)
6. Zwischenschritt bei Tritt auf *Tarsus*

Abbildung 3: Koordinationsmechanismen zwischen den Beinen der Stabheuschrecke (VL $\hat{=}$ Vorne Links, ...)

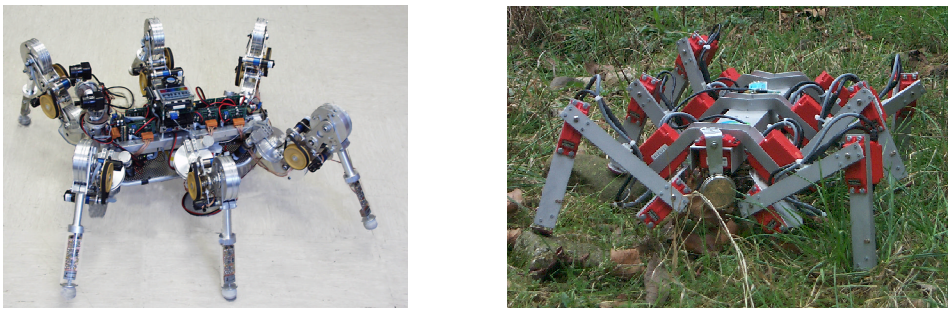
1.1.3 Lauron

Die Gehmaschine LAURON II wurde am Forschungszentrum Informatik in Karlsruhe als Nachfolger von LAURON [Ber94] konzipiert. Im Zuge weiterer Verbesserungen durch die Arbeitsgruppe um Prof. Dillmann ist diese Maschine dann zu LAURON III weiterentwickelt worden.

Ebenso wie der Schreitroboter TUM verfügt LAURON III über sechs bis auf die Symmetrie identische Beine mit jeweils drei Segmenten. Die Längenverhältnisse entsprechen mit 1:4:5 nicht den Verhältnissen der Stabheuschrecke. Die Beine sind um 30° gegenüber der Horizontalen nach unten geneigt am Körper befestigt. Die Vorder- und Hinterbeine sind zusätzlich um jeweils 30° bezüglich der Längsachse nach vorne- bzw. hinten gedreht. Damit entsprechen die Drehungen nur sehr grob den Verhältnissen der Stabheuschrecke und sind hauptsächlich auf leichte Montage hin optimiert.

Die Steuerungsarchitektur dieser Gehmaschine hat im Verlauf der letzten Jahr sehr große Veränderungen erfahren. Die Maschinen LAURON und LAURON II wurden als Plattform zur Untersuchung verschiedener Methoden, wie Reinforcement-Verfahren, Q-Lernen und Backpropagation-Training eingesetzt. Dabei bestand keine konsistente Verbindung zwischen den einzelnen Verfahren. Die entscheidenden Impulse brachten insbesondere die größere Sensorausstattung und die mechanische Verbesserung von LAURON zu LAURON II.

Die mittlerweile auf LAURON III implementierte Architektur ist komplett in algorithmischer Form programmiert. Sie beruht auf einer Gesamtarchitektur, die es



(a) (b)

Abbildung 4: Die Gehmaschinen Lauron (a) und Tarry II (b)

ermöglichen soll, alle am Forschungszentrum Informatik verwendeten Gehmaschinen mit einem einheitlichen Softwareframework kontrollieren zu können. Insgesamt ist ein Ansatz realisiert worden, der große Ähnlichkeiten mit dem in dieser und in früheren Arbeiten, wie [FGLK98], [FGKL99] und [FBG+00a], entwickelten Koordinationskonzept hat. In einem hierarchischen Gesamtsystem wird den Beinen so viel Autonomie wie möglich gewährt. Allerdings existiert eine übergeordnete Ebene, die es ermöglicht, globale Aufgaben, wie beispielsweise Stabilisierung, wahrzunehmen und dabei die einzelnen Beine aus den höheren Schichten heraus gezielt zu beeinflussen.

1.1.4 Zusammenfassung der Koordinationsmechanismen

Methoden, denen eine genaue analytische Kontrolle zugrundeliegt, stoßen durch die hohe Zahl der Freiheitsgrade und die Komplexität der möglichen Umgebungen schnell an ihre Grenzen und sind praktisch kaum zu beherrschen.

Der diese Probleme vermeidende Ansatz besteht in der Nutzung einer dem Vorbild eines realen Insektes ähnlichen, extrem dezentralisierten Kontrolle, basierend auf Regeln und einfacher Kommunikation. Dieser Ansatz findet seine Schranken an der Erweiterbarkeit und der teilweise technisch notwendigen zentralen Kontrolle.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß hierarchische Mechanismen, die einen Teil der Aufgaben in untere Schichten delegieren können, die beste Kombination von Kontrolle und Beherrschbarkeit sowie Flexibilität zu bieten scheinen. Aus diesem Grunde ist auch für die Gehmaschine TARRY ein entsprechender Ansatz verfolgt worden, der in dieser Arbeit vorgestellt wird.

1.1.5 Weitere existierende Gehmaschinen

Durch die freie Zusammensetzung verschiedener Aspekte der dargestellten Methoden sind beliebig viele Kombinationen möglich. Wie sich später zeigen wird, ist aber

auch das Zusammenspiel der Maschine und der Kontrollmechanismen von entscheidender Bedeutung, was die Anzahl der Kombinationen noch erhöht. Die oben kurz vorgestellten Projekte haben bereits eine breite Auswahl gezeigt.

Daneben gibt es eine Vielzahl weiterer Gruppen, die an ähnlichen Projekten arbeiten. Die unterschiedlichen Zielsetzungen, die den gebauten Maschinen und den implementierten Methoden zugrunde liegen, führen allerdings dazu, daß praktisch kein direkter Vergleich möglich ist. Daher sollen hier lediglich einige ausgesuchte Verweise auf weitere aktuelle Projekte gegeben werden, um die TARRY Roboter vor diesem Hintergrund besser einordnen zu können.

Robot III

Die Roboter ROBOT I, ROBOT II und ROBOT III sind an der Case Western Reserve Universität in Ohio (USA) unter der Leitung von Prof. Quinn im Labor für biologisch motivierte Roboter entstanden. Bei dem fortlaufend verbesserten ROBOT handelt es sich um eine Maschine, die der Schabe *Blaberus discoidalis* nachempfunden ist. ROBOT III hat insgesamt 24 Freiheitsgrade. Dabei haben die vorderen Beine jeweils fünf, die mittleren Beine je vier und die hinteren Beine je drei Freiheitsgrade. Dies ist ein deutlicher Unterschied zum Vorgänger ROBOT II, der sechs identische Beine mit je drei Freiheitsgraden genutzt hat. Mit der Anpassung wurde den unterschiedlichen Aufgaben der einzelnen Beinpaare bei dem natürlichen Vorbild Rechnung getragen.

Die Versorgung der pneumatisch betriebenen Aktuatoren erfolgt über eine externe Quelle. Die bestehenden Maschinen werden demnächst um ROBOT IV erweitert werden. ROBOT IV soll sich vollkommen energieautonom bewegen können. Durch die Anpassung der passiven Steifigkeit der Beine soll die hierzu notwendige Verbesserung der Energieausnutzung erreicht werden[NQBF97][QNB+01].

Lobster

Der LOBSTER Roboter, der unter Leitung von Prof. Ayers am Marine Science Institute in Boston und East Point, Massachusetts (USA) entwickelt wird, ist nach dem Vorbild eines Hummers gebaut. Die acht Beine der Maschine sind mit jeweils drei Freiheitsgraden ausgestattet. Zur zusätzlichen Stabilisierung des Roboters dienen drei aktive Elemente, die den Scheren bzw. dem Schwanz nachgebildet und entsprechend rostral bzw. kaudal angeordnet sind. Die Bewegung der Maschine erfolgt durch antagonistische Muskelelemente, die mit Hilfe einer Formgedächtnislegierung realisiert worden sind.

Ziel der Maschine ist es, die besonderen Eigenschaften des Vorbilds bei der Bewegung in flachem Wasser, auch unter Einfluss von Brandung und Strömung, zu erreichen. Dies wird vor allem von den Stabilisierungselementen unterstützt, deren Bewegungen von Beobachtungen am natürlichen Vorbild abgeleitet worden sind. Mit den angestrebten Fähigkeiten soll die Maschine insbesondere in die Lage versetzt werden, auf dem Meeresgrund auch in Küstennähe nach Minen zu suchen. Eine weitere

Besonderheit ist dabei der geplante Einsatz mehrerer LOBSTER Roboter, um große Bereiche abzusuchen. Dabei sollen die Gehmaschinen am Grund von schwimmenden Robotern unterstützt werden. Um bei der autonomen Bewegung der Mechanismen eine vollständige Abdeckung des abzusuchenden Geländes zu erreichen, sollen alle Maschinen von zentraler Stelle aus lose koordiniert werden[AWW+00].

RHex

Der Roboter RHEX, der von der Arbeitsgruppe von Prof. Buehler an der McGill Universität in Montreal (Kanada) gebaut worden ist, hat einige besonders bemerkenswerte Fähigkeiten. Die Maschine hat an ihrem Körper sechs Beine mit jeweils einem rotatorischen Freiheitsgrad montiert. Indem sie auf keine Weise versucht, morphologische Details eines natürlichen Vorbildes nachzubilden, hebt sie sich deutlich von den anderen hier vorgestellten Robotern ab. Durch eine sorgfältige Abstimmung der Kontrollmechanismen und der Elastizität der Beine ist die Maschine ausgesprochen geländegängig. Unter anderem ist der Sechsbeiner mit einer Länge von ca. 51 cm und einem Gewicht von ca. 8 kg der erste energieautonome Sechsbeiner, der dynamische Bewegungen ausführen kann und der einzige, der die Gangart „pronking“ beherrscht[MB01a]. Bei diesem Gang, der in der Regel bei Gazellen beobachtet werden kann, verlassen alle vier Beine praktisch gleichzeitig den Boden. Bei RHEX kann damit im Vergleich zu anderen Gangarten die Vorwärtsgeschwindigkeit bei geringerem Energieverbrauch erhöht werden. Zusätzlich ist die Maschine trotz der geringen Körperhöhe von ca. 13 cm in der Lage, normale Treppenstufen sowohl auf- als auch abwärts zu bewältigen[MB01b].

Eine umfassende Übersicht bereits gebauter, aktueller und noch in der Entwicklung befindlicher Maschinen findet sich bei Berns [Ber01].

1.2 Inhalt und Ziel der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in insgesamt sechs Teile. Auf diese Einleitung folgt im zweiten Kapitel die Vorstellung der an der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg im Fachgebiet Mechanik gebauten Gehmaschinen. Dabei wird zuerst das biologische Vorbild und die grundlegende Konstruktion der hier entwickelten Gehmaschinen vorgestellt sowie die Abweichungen der einzelnen Modelle voneinander betrachtet. Darauf folgt eine Beschreibung der verwendeten Aktorik- und Sensorikelemente, die auf den einzelnen Maschinen in verschiedenen Kombinationen zum Einsatz kommen. Die Meßprinzipien und die Ausgangssignale der Sensoren werden beschrieben.

Das dritte Kapitel behandelt die Kommunikation der Elemente, die zum Betrieb der Gehmaschinen notwendig sind. Dies beinhaltet zum einen die Erfassung der Sensormeßwerte mit Hilfe der beteiligten Meßkarten. Zum anderen fällt die Kommunikation der beteiligten Rechner untereinander in diesen Bereich. Diese Kommunikation ist

notwendig, da die gesamte Bewegungskoordination als verteilte Anwendung konzipiert ist. Das Schichtenmodell der Kommunikation und die verteilten Anfragen der Rechner untereinander werden behandelt.

Das vierte Kapitel erläutert die zur Bewegungskoordination eingesetzten Softwarekomponenten. Die Gangmustererzeugung mit Hilfe der Softwarebibliothek WALKINGLIB und deren Parameter werden dargestellt. Danach folgt zuerst eine kurze Einführung in die Methode der neuronalen Netze. Die Ergebnisse der analytischen und approximativen Gangmustererzeugung werden hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit und Genauigkeit miteinander verglichen.

Im fünften Kapitel wird die Koordinationssoftware selbst behandelt. Dazu werden die hier verwendeten Parameter erläutert und die einzelnen Ebenen der Software näher aufgeschlüsselt. Die Reflexreaktionen werden ebenso beschrieben wie die planenden Module, die durch Beobachtung einer virtuellen Maschine die bereits gewonnen Informationen besser auswerten und damit die Koordination der Maschine in komplexer Umgebung deutlich verbessern. Bei beiden wird das Hauptaugenmerk auf die sinnvolle Behandlung der Ungenauigkeiten gelegt, die durch das Spiel, die Elastizität und die fehlerbehafteten Sensorsignale in die Kontrolle hineinspielen.

Das Zusammenspiel aller beschriebenen Komponenten wird im sechsten Kapitel experimentell überprüft. Dabei werden Tests der Gehmaschine in verschiedenen Umgebungen dokumentiert. Neben dem Gang in einer einfachen Umgebung wird die Behandlung verschiedener Hindernisformen dargestellt.

Das siebte Kapitel faßt die wichtigsten Ergebnisse der vorhergehenden Kapitel zusammen und bietet eine Übersicht über die Möglichkeiten und Fähigkeiten der verschiedenen Gehmaschinen und der zugehörigen Software. Im Ausblick werden die Möglichkeiten für weitere Arbeiten aufgezeigt.

2 Aufbau, Aktorik und Sensorik

2.1 Mechanischer Aufbau

Bei dem Bau einer Gehmaschine muß unter Berücksichtigung des vorgesehenen Einsatzes zuerst die grundlegende Entscheidung getroffen werden, ob Struktur und Kinematik des Roboters sich an natürlichen Vorbildern orientieren soll oder ob eine „freie“ Konstruktion erfolgen soll. Das schließt auch die Zahl der Beine und Gelenke mit ein.

Für den Bau sechsbeiniger Maschinen bieten sich als Vorbilder Insekten (Hexapoden) an. Der Vorteil einer solchen Vorlage ist, daß die entsprechende Insektenart durch ihr bloßes Vorhandensein auch nach einer jahrmillionen dauernder Evolution eine hinreichende Anpassung an ihre Lebensverhältnisse bewiesen hat. Dabei ist natürlich problematisch, daß die genauen „Optimierungskriterien“, die aufgrund des Selektionsdrucks auf die entsprechende Art gewirkt haben, unbekannt sind. Es bleibt aber die Vermutung, daß auch der Bewegungsapparat dieser Art sich stetig verbessert hat, um den Anforderung der Umwelt immer besser zu genügen. Verschiedene Forschungsergebnisse, beispielsweise von G. Pratt [PWD+95], J. Pratt [Pra00], Witte et al. [WHI+00][HWF00], deuten daraufhin, daß der „richtige“ Körperbau, die Art und Lage von Muskeln, Sehnen und Gelenken den notwendigen Kontrollaufwand, insbesondere für dynamisch laufende Mechanismen, extrem verringern kann.

Allerdings ergeben sich aus der Wahl natürlicher Vorbilder auch Nachteile. Die Offensichtlichsten, aber auch am Leichtesten zu bewältigenden, sind die schwierig zu fertigenden Längen und Winkel der entsprechenden Elemente und die jeweils paarweise unterschiedlichen Extremitäten (siehe auch Tabelle 1, Seite 20). Hier muß aber berücksichtigt werden, daß das durchgängige Auftreten von unterschiedlich langen Beinen mit unterschiedlichen Gelenkkonfigurationen darauf hindeutet, daß dieses Prinzip in praktisch allen Fällen sinnvoll ist.

Eine Gefahr besteht allerdings darin, im Nachbau lediglich Biomimikry zu betreiben. Dies ist der Fall, wenn bestimmte Eigenschaften des Vorbildes übernommen

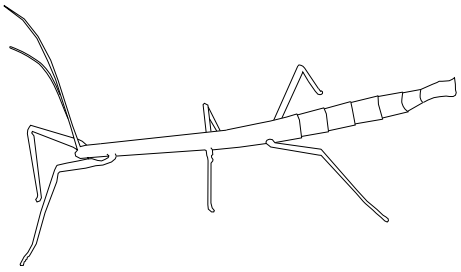


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Stabheuschrecke

werden, ohne deren eigentlichen Sinn tatsächlich zu verstehen und nachzubilden. Da aufgrund fehlender technischer Möglichkeiten die komplette Kopie aller Eigenschaften nicht möglich ist, ergibt sich leicht die Situation, daß Elemente der Vorlage, die erst in ihrer Kombination korrekt wirken, nur teilweise übernommen werden. Es ist also wichtig, das kopierte Modell immer wieder kritisch zu beurteilen und zu optimieren. Im Gegenzug kann dieser Prozeß aber auch helfen, Funktionsweisen des Originals am Nachbau zu erforschen und ein nicht offensichtliches Zusammenspiel von Eigenschaften aufzuzeigen.

Gehmaschinen die sich nicht an natürlichen Vorbildern orientieren, sind zwar technisch oft einfacher zu konstruieren, neigen aber auch zu unharmonischen und eckigen Bewegungsabläufen. Dem Bewegungsapparat mangelt es leicht an den entsprechenden Voraussetzungen für eine runde Bewegung.

Die TARRY[1] Gehmaschinen sind in ihrem Aufbau von der Stabheuschrecke *Carausius morosus* inspiriert (siehe Abbildung 5). Bei diesem Insekt handelt es sich um eine Art aus der Ordnung der *Phasmatodea*. Zu dieser Ordnung mit über 2500 Arten zählt mit dem 300 mm langen *Palophus titan* auch eines der größten Insekten überhaupt [Rem91]. *Carausius morosus* ist dabei mit einer Länge von ungefähr 72 mm ein kleiner Vertreter dieser Ordnung [Bäs88].

Verschiedene Eigenschaften prädestinieren dieses Insekt für weitgehende Untersuchungen Der gesamte Bewegungsapparat dieser Stabheuschrecke ist gut sichtbar. Die Beine sind seitlich am Körper angebracht und sind nicht von einem Panzer oder ähnlichem verdeckt. Dabei haben die Beine einen verhältnismäßig großen Abstand voneinander, wie auch das Insekt selbst relativ groß ist. Dies, verbunden mit den langsamen Bewegungen, die das Tier ausführt, erleichtern die optische Beobachtung des Tieres. Die verhältnismäßig einfache Präparierbarkeit der Neuronen erweitert diese Möglichkeiten zusätzlich und steigert die Attraktivität dieses Insektes für Beobachtungen umso mehr. Die hohe Anzahl bereits bekannter Daten macht *Carausius morosus* auch als Vorbild für eine Gehmaschine attraktiv.

Der geometrische Aufbau aller TARRY Gehmaschinen entspricht grob den Vorgaben, die sich aus der skalierten Geometrie der Stabheuschrecke ergeben. Dabei wurden mit der Weiterentwicklung der Maschine und dem zunehmenden Verständnis bestimmter Eigenschaften Anpassungen vorgenommen, die eine bessere Funktion der Maschine ermöglichen, sich aber vom Vorbild wegbewegen.

2.1.1 Prinzipieller Aufbau

Angelehnt an sein Vorbild (vgl. Abb. 6) bestehen auch die Beine von TARRY aus drei Gliedern, *Coxa*, *Femur* und *Tibia*. Diese Glieder sind jeweils durch ein Drehgelenk miteinander verbunden.

[1] Der Begriff TARRY wird seit dem Bau der zweiten Maschine nicht mehr auf das erste, nun als TARRY I bezeichnete Exemplar bezogen. Stattdessen wird es als Oberbegriff für alle TARRY Gehmaschinen verwendet.

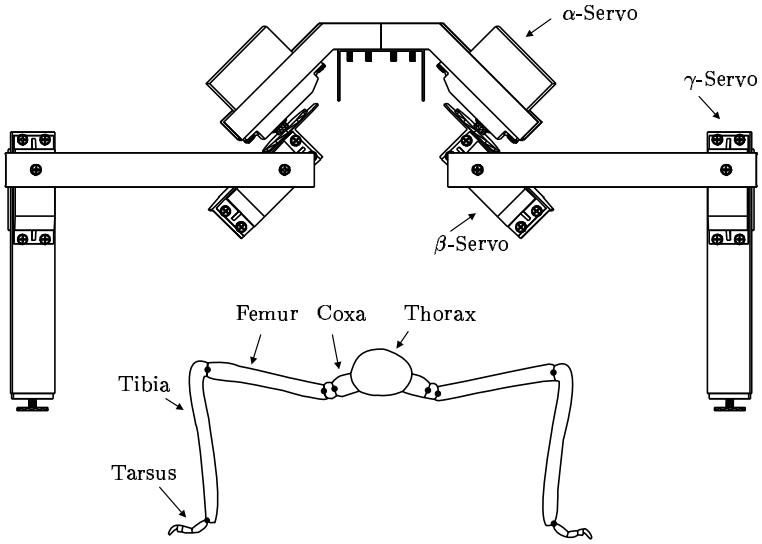


Abbildung 6: Vorderes Segment der Gehmaschine TARRY II im Vergleich zur Stabheuschrecke

Die Drehachsen des *Coxa-Femur* und des *Femur-Tibia*-Gelenkes liegen parallel und stehen senkrecht auf der durch *Femur* und *Tibia* aufgespannten Ebene. Die Drehachse des *Coxa-Thorax*-Gelenkes ist zeitinvariant gegen ein im Ansatzpunkt der Hüfte eingeführtes Koordinatensystem verdreht. Diese Rotation wird in Abschnitt 2.1.2 näher beschrieben. Die drei Beinsegmente werden in der Tabelle 1 (Seite 20) als l_1, l_2 und l_3 bezeichnet. Die Gelenke werden, wie in Abbildung 6 sichtbar, als α-, β und γ Gelenk bezeichnet. Die Bezeichnung und Indizierung der Beine kann Abbildung 7 entnommen werden.

Die Modellierung des *Coxa-Thorax*-Gelenkes als einfaches Drehgelenk stellt eine wesentliche Einschränkung dar. Bei dem natürlichen Vorbild handelt es sich hier um ein Gelenk mit mehreren Freiheitsgraden. Die Vereinfachung wurde unter anderem im Hinblick auf die Tatsache, daß sich bei einem Geradeauslauf in horizontalem, ebenem Gelände die Gelenkbewegung im wesentlichen auf eine Drehung um eine Achse beschränkt, vorgenommen [Cru76][PWD91].

Die Maschinen sollen natürlich in der Lage sein, sich in unebenem Gelände fortzubewegen und Gangarten wie den Seitwärtsgang oder das Drehen auf der Stelle zu beherrschen. Diese Bewegungsabläufe können an dem Vorbild nicht beobachtet werden, daher müssen sie im Experiment auf ihre Nutzbarkeit überprüft werden. Da aber Vorwärts- und Kurvenlauf die Hauptgangarten der Maschinen sind, können kleinere Einschränkung an anderer Stelle toleriert werden, solange diese zusätzlichen Gangarten hinreichend gut ausgeführt werden können.

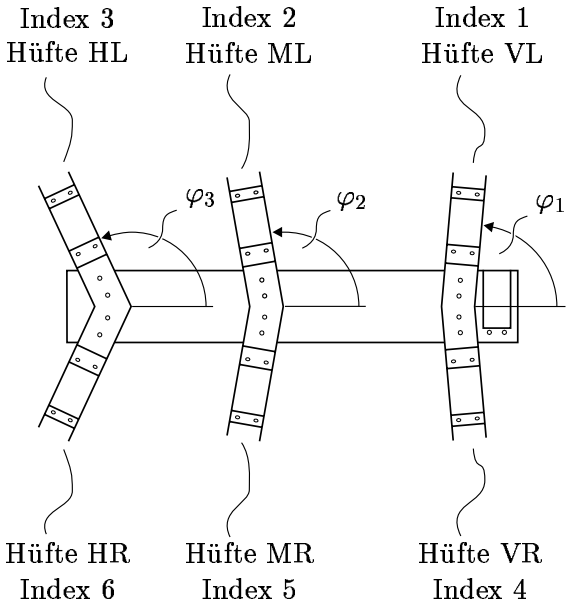


Abbildung 7: Zentralkörper mit den Bein- und Hüftbezeichnungen sowie deren Numerierung

2.1.2 Koordinatensysteme

Ebenso wie die grundlegenden geometrischen Verhältnisse sind Lage und Orientierung der verwendeten Koordinatensysteme der Gehmaschinen ähnlich.

Jede der Maschinen besitzt ein körperfestes Koordinatensystem, das als Ausgangspunkt für weitere Berechnungen dient. Die Lage dieses Systems ist in Abbildung 8 dargestellt. Das Rechtssystem befindet sich in der Mitte der Verbindungslinie der Drehpunkten der α-Gelenke des mittleren Beinpaares. Die ${}^{r}z$-Achse zeigt nach oben und die ${}^{r}x$-Achse in die Vorwärtsrichtung.

Dieses System dient als Ausgangspunkt für die meisten Berechnungen. An einigen Stellen kann es vereinfachend sein, ein raumfestes System ${}^{i}\mathcal{K}$ als Hilfssystem zu verwenden. Zusätzlich sind für jedes der Beine weitere Koordinatensysteme eingeführt:

- Ein zentralkörperfestes Koordinatensystem im Drehpunkt des Hüftgelenkes des jeweiligen Beines. Dieses System hat die gleiche Orientierung wie das Referenzsystem (Index k).
- Das *Coxa*-System (Index c). Dieses Gelenk hat den gleichen Ursprung wie das k-System, ist aber um die Winkel φ in ein Hilfssystem (Index a) und darauf um ψ in seine endgültige Lage verdreht. Dadurch bildet die ${}^{c}z$-Achse die erste Gelenkachse des Beines. Dies ist die Achse, um die sich das *Coxa*-Segment

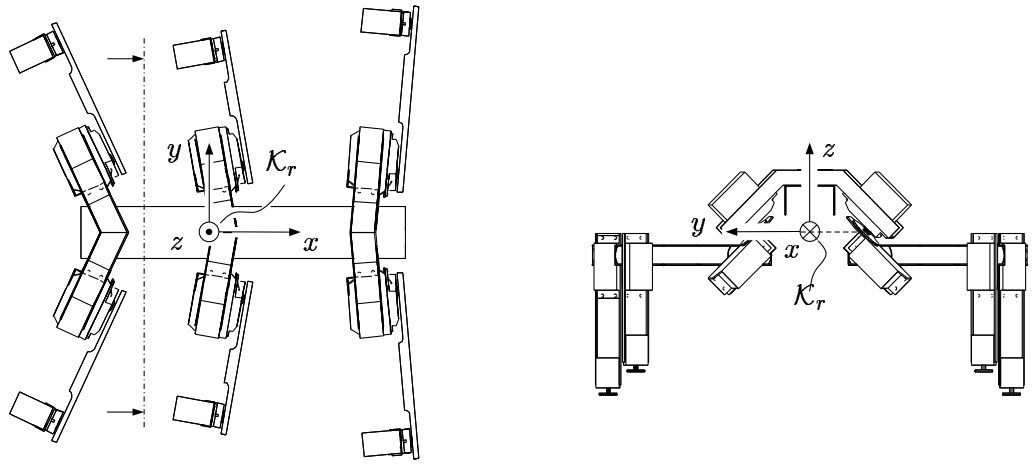


Abbildung 8: Lage des körperfesten Referenzsystems

dreht. In der Mittelstellung des Beines fallen dessen Längsachse und die ${}^c x$-Achse zusammen.

- Für die beiden weiteren Beinsegmente *Femur* und *Tibia* je ein segmentfestes Koordinatensystem, dessen x-Achse in Richtung der Segmentlängsachse weist. Dabei bildet die z-Achse jeweils die Drehachse des zugehörigen Gelenkes.

Der überwiegende Teil der zur Berechnung verwendeten Koordinatensysteme hat die gleiche Orientierung wie das Referenzsystem. Hier reicht also ein Verschiebungsvektor zur Beschreibung der Transformation aus. Die Komponenten können mit Hilfe der oben angegebenen Geometriedaten leicht bestimmt werden. Lediglich die Transformation vom k- in das c-System erfordert eine Rotationsmatrix. Für sie gilt:

$${}^c\boldsymbol{R}_k = \begin{pmatrix} \cos\varphi\cos\psi & -\sin\varphi & \cos\varphi\sin\psi \\ \sin\varphi\cos\psi & \cos\varphi & \sin\varphi\sin\psi \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi \end{pmatrix}$$

Die beinbezogenen Koordinatensysteme werden für die in Abschnitt 4.1 beschriebene analytische Erzeugung der Gangmuster genutzt. Intern finden diese Systeme auch in der Repräsentation und Berechnung des Körpermodells in Abschnitt 5.3.2 Verwendung.

2.2 Die ausgeführten Gehmaschinen

2.2.1 Tarry I

Die Gehmaschine TARRY I ist im Rahmen der Arbeit von AMENDT [Ame95] entwickelt und vorgestellt worden. Die Geometrie der Maschine, die der Tabelle 1 zu

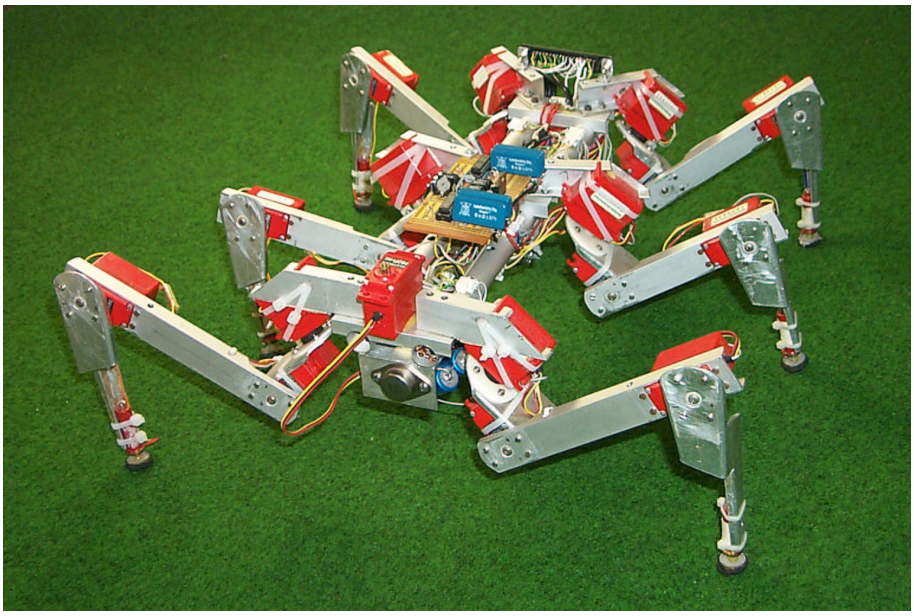


Abbildung 9: Die Gehmaschine TARRY I

entnehmen ist, lehnt sich sehr stark an die Geometrie der Stabheuschrecke an, wie sie von CRUSE in [Cru76] beschrieben wurde. Aus konstruktiven Gründen ist allerdings das *Coxa*-Element vergleichsweise groß ausgefallen. Um die Belastung der ohnehin an ihren Grenzen arbeitenden β-Servomotoren zu vermindern, sind die Beinsegmente verkürzt worden.

Die Struktur der Maschine ergibt sich aus den verwendeten Aluminiumrohren und den umgeformten Aluminiumblechen. Diese zeichnen sich bei geringem Gewicht durch eine verhältnismäßig hohe Biege- und Torsionssteifigkeit aus. Die Maschine hat dadurch eine Gesamtmasse von nur 2100 g.

Der Zentralkörper besteht aus zwei parallelen Aluminiumrohren. Sie werden verbunden durch drei Profile in den Hüftbereichen. Diese dienen auch der Befestigung der Hüftgelenke aller sechs Beine (siehe Abbildung 9). Die Längsabstände zwischen den Hüften und die Hüftbreiten selbst ergeben sich aus der Lage der Koordinatensysteme, wie sie in Tabelle 2 angegeben sind.

Die einzelnen Elemente werden je nach Anforderungen und Möglichkeiten zum Teil durch Verschraubung, aber auch durch Klebeverfahren verbunden. Dies führt insbesondere bei stark beanspruchten Verbindungen leicht zu Verschiebungen. Zusätzlich ist es schwierig, veränderte oder reparierte Teile korrekt zu repositionieren.

Als Gelenk und Antrieb zugleich dienen Servomotoren der Firma Multiplex. Hier sind die Modelle der Serie „profi“ verwendet worden. Deren Daten können Tabelle 3 entnommen werden.

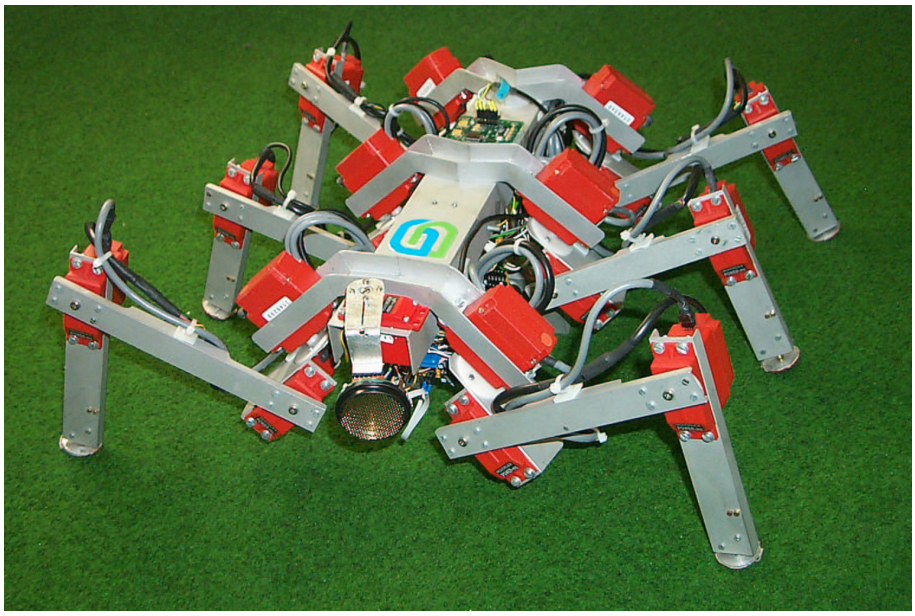


Abbildung 10: Die Gehmaschine TARRY II

2.2.2 Tarry II

In der Gehmaschine TARRY II konnten die Erfahrungen, Erkenntnisse und das fortschreitende Verständnis für den gesamten Mechanismus, die sich aus dem Betrieb von TARRY I ergeben hatten, genutzt werden, um Schwachstellen auszuschalten und die Abläufe zu optimieren.

Die Neukonstruktion ist insbesondere unter Berücksichtigung folgender Ziele erfolgt:

- Vergrößerung der Tragfähigkeit/Gesamtleistung

  Die Maschine sollte in die Lage versetzt werden, ein größeres Repertoire an Gangarten auszuführen. Dabei war insbesondere das Ersteigen flacher Treppen vorgesehen. TARRY I war hierzu aufgrund der geringen Leistungen der verwendeten Servomotoren nicht in der Lage.

- Erhöhte Modularisierung

  Um den kurzfristigen Austausch von Bauteilen zu Test- oder Reparaturzwecken zu ermöglichen, sollte die Struktur stärker modularisiert werden. Dies galt sowohl für die Konstruktion der Bauteile und der verwendeten Elemente als auch für die Montage bzw. Demontage.

- Verbesserung der Sensorik

  Die an TARRY I verwendete Sensorik zur Erkennung des Bodenkontaktes hat verschiedene Schwächen. Neben der bereits angesprochenen Modularisierung

liegt ein besonderes Problem in der exponierten Lage der Verkabelung. Die Anschlüsse bleiben leicht an Hindernissen hängen und werden beschädigt. Eine verbesserte Kabelführungsmöglichkeit sollte deshalb zusätzlich berücksichtigt werden.

Die Neukonstruktion der Gehmaschine besteht hauptsächlich aus Aluminium-Profilen. Auf die Verwendung gebogener Bleche ist aus Gründen der leichteren Austauschbarkeit komplett verzichtet worden. Die beiden Rohre des Zentralkörpers sind durch ein entsprechendes U-Profil ersetzt worden. Wie den Daten aus den Tabellen 1 und 2 entnommen werden kann, sind die Körpermaße leicht gestiegen, insgesamt aber ähnlich geblieben. Die wichtigste Änderung besteht in der Anpassung der Hüftwinkel φ an leichter zu fertigende Werte und die deutliche Verkleinerung dieses Winkels für das hintere Hüftgelenk. Dadurch wird der Tatsache, daß die Aufgabenteilung der Beine nicht der der Stabheuschrecke entspricht, Rechnung getragen. Durch ihre weiterentwickelten Tarsi, die *Carausius morosus* auch das Erklettern von Glasscheiben und das Umfassen schmaler Äste ermöglicht, ist das Insekt in der Lage, die hinteren und mittleren Extremitäten hauptsächlich für die Lokomotion zu verwenden, während die Vorderbeine dem Tasten und Erkunden dienen. Dies wird auch durch den langen Körper, der den Schwerpunkt nach hinten verlagert, unterstützt.

Der Gehmaschine mit ihren einfach ausgeführten Füßen, fehlt die Fähigkeit, sich am Untergrund festzuhalten. Daher beruht die Fortbewegung hier lediglich auf der Reibung zwischen den Tarsi und dem Untergrund. Damit sind die schiebenden Bewegungen des Insektes kaum nachzubilden, da die Hinterbeine der Maschine bei vergleichbaren Gelenkkonfigurationen zu rutschen beginnen. Um die Lokomotion der Maschine zu verbessern, sind die entsprechenden φ-Winkel der hinteren Hüftgelenke verkleinert worden.

Die Forderungen nach verbesserter Sensorik konnten ebenso erfüllt werden, wie die erhöhte Modularität. Die Erhöhung der möglichen Traglast wurde durch die Verwendung von Multiplex Servomotoren der „power“ Serie als Antriebe in den Gelenken erreicht. Die Maschine hat eine Gesamtmasse von ca. 2950 g, erreicht aber durch die deutlich stärkeren Motoren (vgl. Tabelle 3) dennoch eine im Vergleich zu TARRY I deutlich erhöhte Nutzlast. Mit dieser Ausstattung können Steigungen von ca. 15° bewältigt werden. Die hohe Elastizität des Gesamtmechanismus ist dabei erhalten geblieben. Bei der Belastung eines Fußes ohne Bodenkontakt mit einer Kraft von 5 N in Richtung der ${}^{r}x$-Achse verschiebt sich der entsprechende Fuß, je nach Beinkonfiguration, um über 30 mm in Kraftrichtung. Diese Eigenschaft zu berücksichtigen gehört daher mit zu den Aufgaben der vorgestellten Koordinationsmechanismen.

Eine Maschine mit den gleichen Abmessungen und einer ähnlichen Ausstattung, die ebenfalls im Fachgebiet Mechanik gebaut worden ist, wird an der Universität Bielefeld im Fachgebiet Biologische Kybernetik in der Arbeitsgruppe von Professor Cruse betrieben. Sie trägt den Namen TARRY IIB und dient dazu, Simulationen der biologischen Steuerungsarchitektur der Stabheuschrecke zu verifizieren.

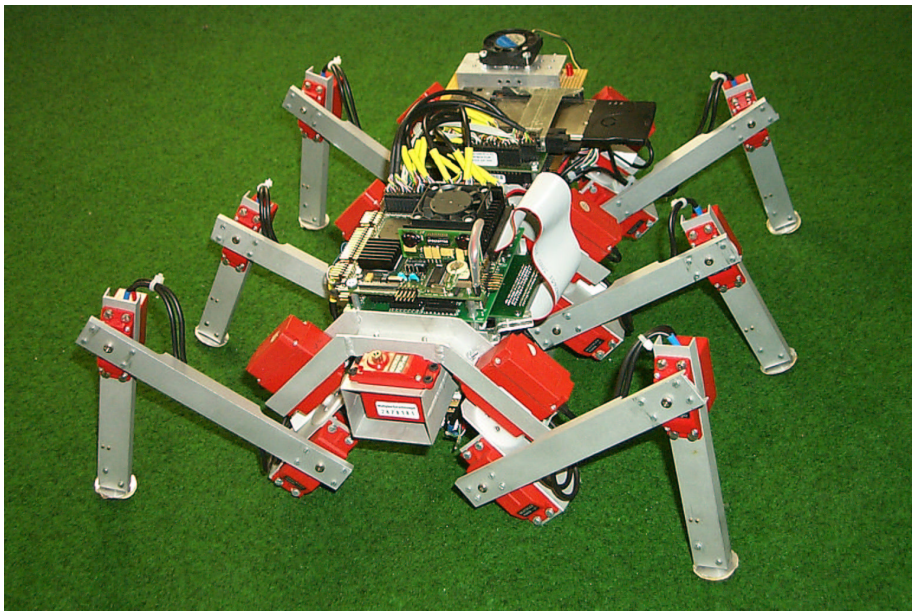


Abbildung 11: Die Gehmaschine TARRY IIA

2.2.3 Tarry IIa

Bei TARRY IIa handelt es sich um die jüngste Weiterentwicklung von TARRY II. Auch wenn in der vorliegenden Arbeit die Kontrollautonomie des Roboters im Vordergrund steht, ist die gleichzeitige Prozessor- und Energieautonomie als höchstes Ziel für eine entsprechende Maschine zu betrachten.

Um zu demonstrieren, daß das vorgestellte Konzept in Verbindung mit dem gebauten Maschinentyp in der Lage ist, prinzipiell auch diese Anforderungen zu erfüllen, ist TARRY IIA gebaut worden.

Der bisher eingesetzte externe Rechner, der die Kontrolle des Roboters über eine Kabelverbindung übernahm, wird hier durch einen auf der Maschine installierten PC/104 Computer [PC/01] ersetzt. Um dies zu ermöglichen, sind kleine Änderungen in den Abmessungen des Zentralkörpers notwendig, die Tabelle 2 entnommen werden können. Über eine Funknetzwerkkarte ist es möglich, die Funktion des Rechners zu beobachten und zu beeinflussen. Der integrierte Rechner und die notwendige Peripherie haben eine Masse von ca. 500 g. Um dieser zusätzlichen Last Rechnung zu tragen und starke Verformungen zu verhindern, mußte die Struktur weiter versteift werden. Dabei wurde darauf geachtet, daß im Inneren des nun geschlossenen Zentralkörpers Raum zur Aufnahme von Akkumulatoren verbleibt, um die Maschine zusätzlich mit einer eigenen Energieversorgung ausstatten zu können. Die Gesamtmasse des Roboters hat sich durch die verschiedenen Maßnahmen auf insgesamt 3100 g erhöht.

Tabelle 1: Beingeometrie der Gehmaschinen und *Carausius morosus* gegenübergestellt

	TARRY					TARRY II				
Bein	φ [°]	ψ [°]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	φ [°]	ψ [°]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]
VL	86	39	35	128	134	85	45	18	145	140
ML	103	41	35	98	118	100	45	18	115	117
HL	132	45	35	110	129	115	45	18	125	130
VR	-86	39	35	128	134	-85	45	18	145	140
MR	-103	41	35	98	118	-100	45	18	115	117
HR	-132	45	35	110	129	-115	45	18	125	130
	Carausius morosus					TARRY IIa				
Bein	φ [°]	ψ [°]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	φ [°]	ψ [°]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]
VL	86	39	1,8	16,0	15,1	85	45	18	145	135
ML	103	41	1,7	12,3	11,6	100	45	18	115	113
HL	132	45	1,7	13,8	13,5	105	45	18	128	125
VR	-86	39	1,8	16,0	15,1	-85	45	18	145	135
MR	-103	41	1,7	12,3	11,6	-100	45	18	115	113
HR	-132	45	1,7	13,8	13,5	-105	45	18	128	125

Tabelle 2: Körpergeometrie der Gehmaschinen gegenübergestellt

	TARRY			TARRY II			TARRY IIA		
	${}^r x_k$ [mm]	${}^r y_k$ [mm]	${}^r z_k$ [mm]	${}^r x_k$ [mm]	${}^r y_k$ [mm]	${}^r z_k$ [mm]	${}^r x_k$ [mm]	${}^r y_k$ [mm]	${}^r z_k$ [mm]
VL	159	55,5	0	148	55,3	0	146	52	0
ML	0	56,5	0	0	55,3	0	0	50	0
HL	-138	48,0	0	-123	56,5	0	-130	48	0
VR	159	-55,5	0	148	-55,3	0	146	-52	0
MR	0	-56,5	0	0	-55,3	0	0	-50	0
HR	-138	-48,0	0	-123	-56,5	0	-130	-48	0

2.3 Elemente der Aktorik und Sensorik

Um Gehmaschinen in die Lage zu versetzen, mit einer a priori unbekannten Umgebung zu interagieren, müssen sowohl die notwendige Aktorik als auch entsprechende Sensoren vorgesehen werden, mit denen sie diese Umwelt erfassen und bewältigen können.

Zu den Daten, die dabei zu erfassen sind, zählen zuerst die Informationen, welche Beine gerade Bodenkontakt haben oder mit Hindernissen kollidiert sind. Aber auch viele weitere Meßwerte können verwendet werden, um die Möglichkeiten der Maschinen zu steigern. Darunter fallen die mechanischen Beinbelastungen, die Stellpositionen der Gelenke und die Orientierung der Maschine im Schwerefeld ebenso wie die Lage möglicher Hindernisse vor oder unter der Maschine.

Im Laufe der Entwicklung sind an den verwendeten TARRY Gehmaschinen verschiedene Servomotoren sowie Sensoren und Meßmethoden zum Einsatz gekommen. Allen gemein ist, daß keine besondere Bindung in Form bestimmter Schnittstellen zu der jeweiligen Maschine vorliegt. Es wäre prinzipiell möglich, jedes der verwendeten Elemente an jeder der verwendeten Maschinen zu montieren und einzusetzen. Bedingt durch die fortschreitende Entwicklung und den Einsatzzweck der jeweiligen Maschinen geschieht dies in der Regel nur aufwärtskompatibel, das heißt Sensorik einer älteren Maschine kann auch bei der Montage des Nachfolgers verwendet werden. Aufgrund der prinzipiellen Austauschbarkeit sollen diese Bauteile dennoch unabhängig von den verschiedenen Maschinenmodellen beschrieben werden.

Bei allen verwendeten Elementen wurde darauf geachtet, möglichst robuste, gegen Beschädigung unempfindliche oder entsprechend geschützte Teile zu verwenden, um eventuelle Ausfallzeiten und Kosten gering zu halten. Ein weiteres Ziel war es, nur Bauteile zu nutzen, deren Kosten in einer sinnvollen Relation zum Gesamtpreis der Maschine standen.

2.3.1 Servomotoren

Die zum Antrieb der Gehmaschine verwendeten Servomotoren (Servos) stammen aus der Flugmodelltechnik. Aufgrund dieses ursprünglichen Einsatzzwecks besitzen sie, bezogen auf das Gewicht, ein verhältnismäßig hohes Drehmoment. Die Daten der in den Gehmaschinen eingesetzten Servos sind in Tabelle 3 dargestellt.

Die Servomotoren (siehe Abbildung 12) werden von einem Gleichstrommotor angetrieben, der über ein Metallgetriebe die Steuerscheibenwelle mit dem außen liegenden Ruderhorn stellt. Das Metallgetriebe enthält zwei Kunststoffelemente als Sollbruchstellen bei Überlastung. Das innere Ende der Steuerscheibenwelle ist mit einem Präzisionspotentiometer verbunden. Dieses Potentiometer dient als Drehwinkelgeber. Der mikroprozessor-basierte Regler vergleicht die Soll-Größe der Winkelstellung

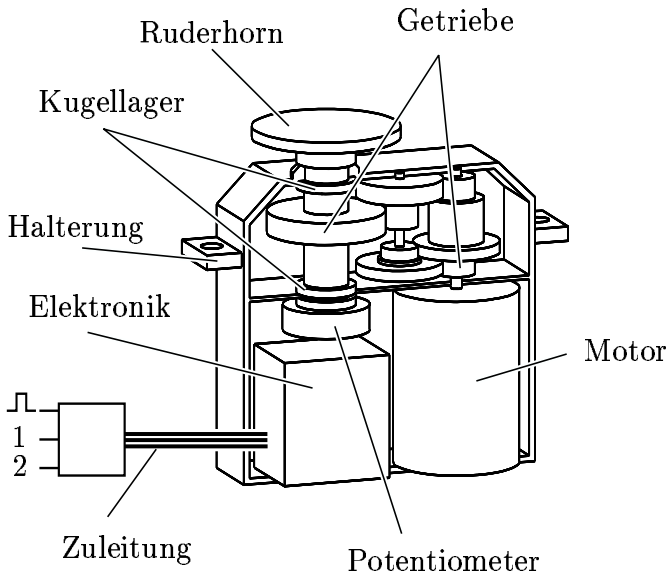


Abbildung 12: Schematische Darstellung eines Multiplex Servomotors

mit der durch den Winkelgeber gegebenen Ist-Position. Im Falle einer Abweichung generiert die Elektronik eine Gleichspannung als Stellgröße, um mit dem Motor den Servo nachzustellen.

Die Soll-Position wird dem Servo mit Hilfe einer pulsmodulierten Eingangsspannung übermittelt. Dabei wechselt der Pegel zwischen 0 V *(Low Level)* und 5 V *(High Level)*. Diese Referenzposition wird durch die Dauer Δt_h des High Signales festgelegt. Der Servo hat einen Verfahrweg von ca. $\pm 57°$, wobei sowohl der Nullpunkt als auch der überstrichene Winkel des Verfahrwegs durch eine Umprogrammierung der Mikroprozessorsteuerung beeinflußt werden können. Diese Umprogrammierung nimmt ca. 1 s in Anspruch und ist daher während des Betriebs der Maschine praktisch nicht durchführbar. Aus den Grenzen des Verfahrweges und der genauen Einbaulage bestimmen sich auch die geometrischen Grenzen der möglichen Beinbewegungen.

Tabelle 3: Daten der Multiplex Servomotoren

	profi mc	power mc	power mc v2
Abmaße (B × H × T)[mm]	36 × 39 × 19	44 × 47 × 23	47 × 47 × 23
Masse [g]	48	75	82
max. Moment [Ncm]	48	120	87
Stellzeit [°/s]	333	250	174
Preis [DM]	ca. 130	ca. 200	ca. 200

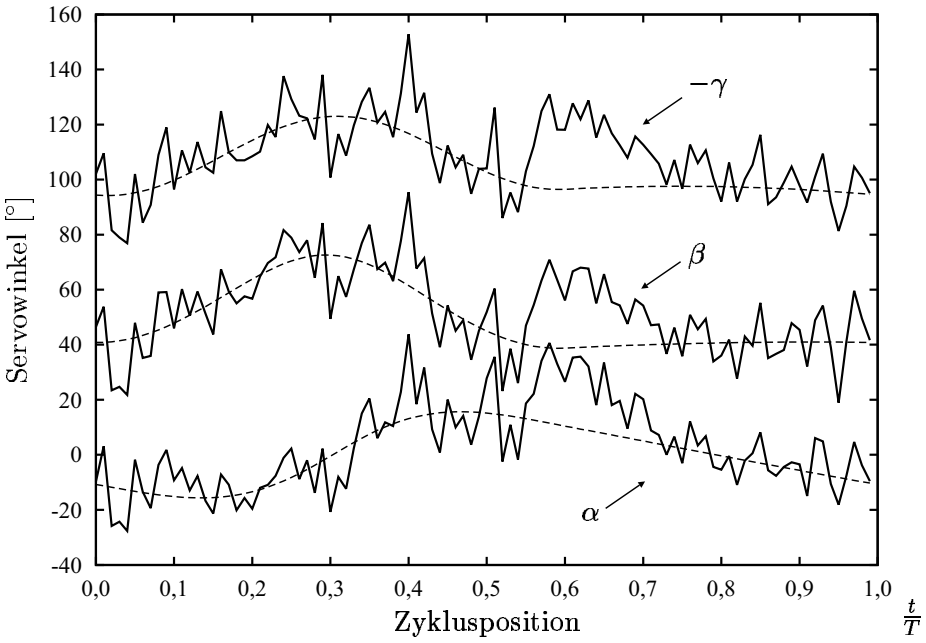


Abbildung 13: Winkelmessung nach AMENDT [Ame95]

Allerdings liegen diese Grenzen in der Regel in Bereichen, die bezüglich der notwendigen Stell- bzw. Haltemomente bereits ausgesprochen ungünstig sind.

Durch einen Umbau des Servos ist es möglich, das Signal des Potentiometers herauszuführen und auch extern zu messen. Zusätzlich kann der vom Motor aufgenommene Strom gemessen und zur Abschätzung der mechanischen Belastung herangezogen werden.

Zwei Schaltungen dieser Art sind bereits in [Ame95] erläutert worden. Beide Schaltungen sind seitdem aber grundlegend verbessert worden und sollen daher an dieser Stelle in ihrer neuen Form vorgestellt werden.

Stellwinkel

In der oben genannten Arbeit war eines der Ziele, die Winkelstellungen der Servomotoren für den Zeitschritt t_{n+1} aus den gemessenen Winkeln des Zeitschritts t_n mit Hilfe neuronaler Netze (siehe Kapitel 4.3) zu generieren. Dabei wurde besonderer Wert auf die hohe Fehlertoleranz dieses Verfahrens gelegt. Daher war es weder notwendig noch erwünscht, eine hohe Genauigkeit der Messung zu erreichen. Die neueren Steuerungsstrategien der Gehmaschine verwenden diese Rückführung der Stellgrößen nicht, sondern verlassen sich auf einen künstlichen Schrittmacher der, in Anlehnung an einen natürlichen rhythmischen Mustergenerator bei Lebewesen, einen Bewegungstakt vorgibt (vgl. Kapitel 4). Bei dieser Steuerungsstrategie

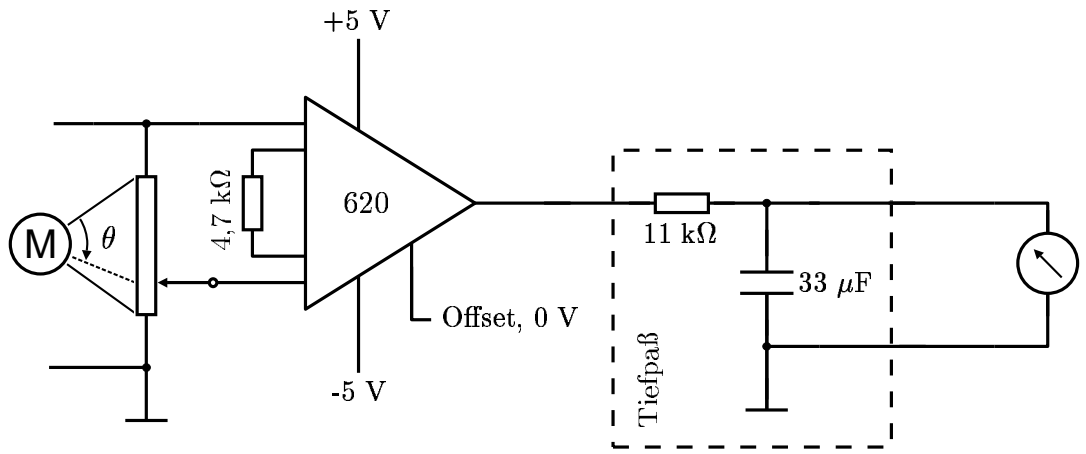


Abbildung 14: Schaltschema der Servo-Winkelmessung

dient die gemessene Gelenkposition lediglich als Zusatzinformation. Eine besondere Genauigkeit ist also auch hier nicht notwendig.

Weitere Exemplare der Gehmaschine TARRY, wie der in Abschnitt 2.2.2 angesprochene TARRY IIb sollen auch als Experimentalplattform für andersartige Steuerungsstrategien verwendet werden. Diese können sich völlig von den in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren unterscheiden. Eine dieser zu testenden Methoden ist die in [CKS+98] vorgestellte „positive Rückkopplung“. In diesem Verfahren werden die Winkeländerungen der Gelenke von einem Zeitschritt zum nächsten verwendet, um daraus die weitere Bewegung der Maschine abzuleiten. Erste Versuche mit diesem Algorithmus haben ergeben, daß die Meßgenauigkeit der bisher verwendeten Schaltung dessen Anforderungen nicht genügen kann.

In der bisher verwendeten Meßschaltung wurden die Potentiometersignale gemessen, verstärkt und zur Rauschunterdrückung durch einen Tiefpaß gefiltert. In der Abbildung 13 ist der vorgegebene (gestrichelt) und der gemessene Verlauf (durchgezogen) dargestellt.

Wie zu erkennen ist, weisen die Messungen in beiden Richtungen starke Schwankungen um den vorgegebenen Verlauf auf. Ferner ist zu erkennen, daß in dem Bereich um 0,6 t/T eine starke Abweichung von der Vorgabe vorliegt. Hier zeigt sich die deutliche Abhängigkeit dieser Methode vom Belastungszustand der Maschine, da in diesem Bereich ein Wechsel von der sechsbeinigen in eine dreibeinige Standphase stattfindet. Da die in den Servos enthaltenen Gleichstrommotoren und die Potentiometer ihre Spannung aus der gleichen Spannungsquelle beziehen, schlagen sich deren Schwankungen deutlich in den Meßergebnissen nieder. Bei einer Belastung der Motoren und der damit verbundenen Erhöhung der Stromaufnahme kommt es auch zu Schwankungen in der Spannung.

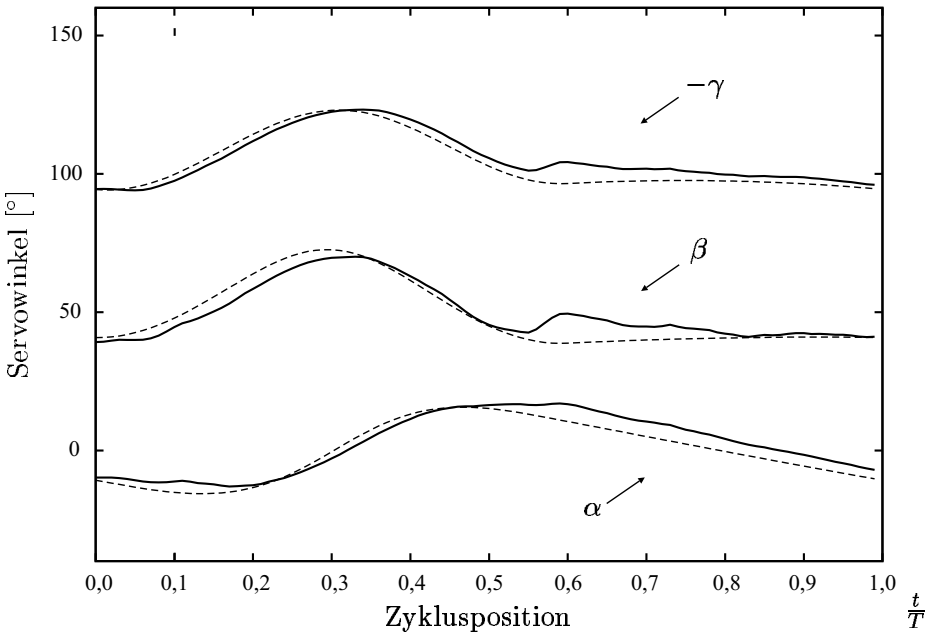


Abbildung 15: Verbesserte Winkelmessung

Da die oben dargestellte Strategie auf der Weiterverarbeitung der Winkeldifferenzen beruht, verhindern die Schwankungen der Meßwerte ein zufriedenstellendes Ergebnis.

In einer verbesserten Schaltung, die in Abbildung 14 dargestellt ist, wird dieses Problem durch die Verwendung eines geeigneten Instrumentationsverstärkers, der beispielsweise in [Sch97] beschrieben wird, gelöst. Mit Hilfe dieser integrierten Version von drei einzelnen Operationsverstärkern ist es möglich, die störenden Gleichtaktsignale zu unterdrücken. Im Anschluß erfolgt ebenfalls eine Tiefpaßfilterung mit einer Eckfrequenz von 2,75 Hz. Durch die Verwendung dieser Schaltung wurde es möglich, die Genauigkeit der Messung deutlich zu steigern. Die entsprechende Messung und die vorgegebenen Winkel sind in Abbildung 15 dargestellt.

Der gemessene Verlauf läßt erkennen, daß die Schwankungen deutlich zurückgegangen sind. Auch hier ist eine leichte Abweichung im Bereich 0,6 t/T festzustellen. Mangels einer externen Vergleichsmessung der Winkelverläufe kann nicht genau festgestellt werden, woher die vorhandene Differenz der Messung zu den vorgegebenen Verläufen rührt. Es ist allerdings anzunehmen, daß die Servomotoren durch die durchgängig starke Belastung an dieser Stelle nicht mehr in der Lage sind, die Sollposition zu erreichen um den Fehler komplett auszuregeln.

Mit der neuen Meßmethode läßt sich eine deutliche Verbesserung des Ergebnisses erreichen. Damit wird auch die Erprobung anderer als der in dieser Arbeit vorgestellten Steuerungsstrategien möglich.

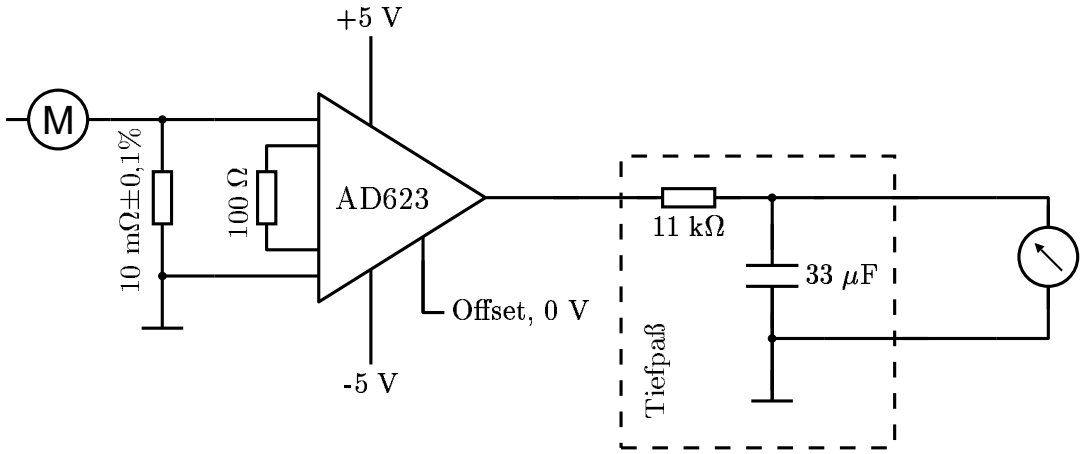


Abbildung 16: Schaltschema der Servo-Strommessung

Servoströme

Wird ein Beinsegment in seiner Bewegung behindert, so erhöht sich die Leistungsaufnahme des antreibenden Servomotors. Bei gleichbleibender Spannung äußert sich dies in einer steigenden Stromaufnahme.

Die Stromaufnahme eines Servomotors kann mit der in Abbildung 16 gezeigten Schaltung ermittelt werden. Um mit gängigen Meßkarten arbeiten zu können, wird der durch den Servostrom über einen Meßwiderstand erzeugte sehr kleine Spannungsabfall auf einen erweiterten Bereich verstärkt. Zusätzlich wird das Ausgangssignal mit einem RC-Tiefpaßglied mit einer Eckfrequenz von ca. 2,75 Hz gefiltert.

Diese Schaltung ist bei allen Gehmaschinen nur für die α-Servomotoren installiert. Da diese Servomotoren die Hauptlast für die Lokomotion in die Maschinenlängsrichtung und den Kurvenlauf tragen, wirken sich Beinkollisionen auch hauptsächlich in diesen Servomotoren aus. Es ist allerdings zu beachten, daß diese Messung nur während der Schwingphase, also wenn das Bein keinen Bodenkontakt hat, zuverlässig ist. In der Stemmphase stützt und bewegt das Bein die Maschine. Dadurch steigt bereits die Grundbelastung so stark an, daß eine weitere Belastung durch eine Kollision nicht erkannt werden kann.

In Abbildung 17 ist ein solcher Meßschrieb für die Kollision mit einem Hindernis in der Schwingphase beim Gang in der Ebene dargestellt. Die Stemmphasen sind im Diagramm grau hinterlegt. Deutlich sind die Kollisionen im dritten und sechsten Schritt zu erkennen.

Um eine genauere Detektion zu erreichen, ist es notwendig, diese Methode mit der Messung weiterer Daten zu kombinieren.

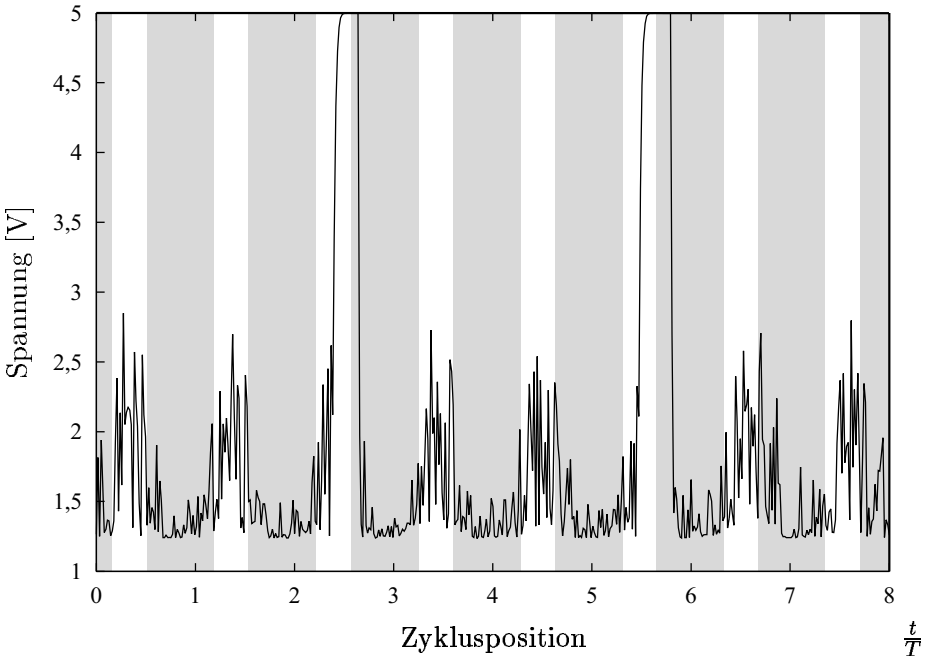


Abbildung 17: Daten der Servobelastungsmessung

2.3.2 Aufstandssensor

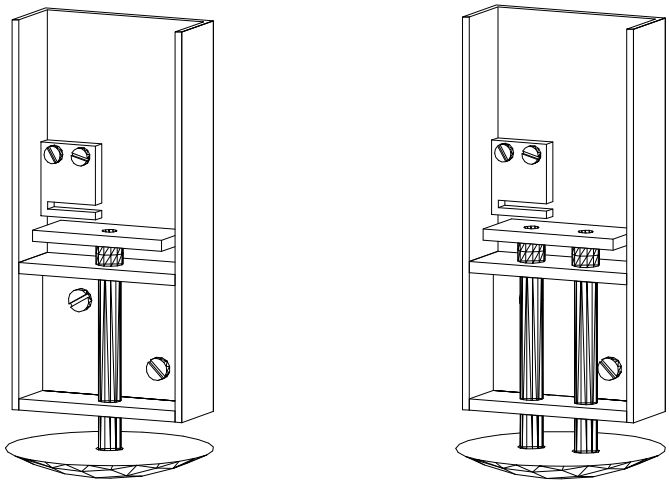
Das wichtigste Element zur Koordination von Gangbewegungen ist die Kenntnis der aktuellen Bodenkontakte jedes Fußes. Durch die Elastizität der verwendeten Maschinen ist dieser Wert, selbst bei ebenem Untergrund, nicht einwandfrei aus den Gelenkwinkeln zu ermitteln. Bei unbekanntem, unebenem Gelände ist dies sogar prinzipiell unmöglich. Daher muß ein entsprechender Sensor, hier Aufstandssensor genannt, für jedes Bein den aktuellen Bodenkontakt bestimmen.

Das Herzstück des (bei TARRY II und TARRY IIa) eingesetzten Aufstandssensors besteht aus einem Subminiaturtaster D2MQ-1L--105 der Firma Omron, dessen Daten in Tabelle 4 dargestellt sind.

Die Messung des eigentlichen Bodenkontaktes erfolgt über einen in Abbildung 18 schematisch dargestellten mechanischen Taster. Mit Hilfe des gezeigten Umlenkme-

Tabelle 4: Subminiaturtaster des Aufstandssensors [Omr00]

Abmaße (B × H × T) [mm]	6,5 × 8,3 × 2,7
Gewicht [g]	0,3
Betätigungskraft [N]	0,3
Preis [DM]	ca. 3,95



(a) (b)

Abbildung 18: Fußtaster mit einfacher (a) und doppelter (b) Führung

chanismus wird bei einem Bodenkontakt des Fußes der Stromkreis des Tasters geöffnet. Die Messung der über einen Widerstand im Stromkreis abfallenden Spannung detektiert dann einen entsprechenden Anstieg. Geht das Bein in die Schwingphase über, so verliert der Fuß seinen Bodenkontakt. Durch das Eigengewicht des Fußes wird der Umlenkmechanismus wieder in seine Anfangsposition bewegt und die gemessene Spannung fällt wieder entsprechend ab.

Die öffnende Funktion des Tasters wurde gewählt, um insbesondere Fehler in der Verkabelung leichter zu erkennen zu können. Wenn die Maschine angehoben wird und die entsprechenden Spannungen nicht abfallen, ist entweder der Sensor selbst defekt oder verklemmt, oder ein Kabel ist beschädigt. Besonders Wackelkontakte oder Kabelbrüche sind so einfacher zu erkennen, da eine mechanische Fehlfunktion des Sensors bei entsprechender Lage der Füße leicht auszuschließen ist. Im Vergleich zu der weniger geschützt montierbaren Verkabelung der Sensoren von TARRY I treten allerdings auch deutlich weniger Defekte dieser Art auf.

2.3.3 Dehnungsmeßstreifen

Um den Verlauf der Belastungen der Extremitäten exakter bestimmen zu können, sind an den Beinen Dehnungsmeßstreifen (DMS) appliziert worden. Mit den DMS ist es möglich, die (elastischen) Verformungen, die sich aufgrund der von außen wirkenden Kräfte und Momente in einem Bauteil einstellen, zu messen.

Bei der Verwendung von DMS wird der Effekt genutzt, daß sich der ohmsche Widerstand eines stromdurchflossenen Leiters bei einer Längung proportional zu seiner Längenänderung verhält. DMS haben für die verwendeten Maschinen den Vorteil,

daß sie besonders klein und leicht sind. Ebenso ist die nicht vorhandene Ansprechschwelle für den geplanten Einsatzzweck von Vorteil. Problematisch ist hauptsächlich die hohe Beschädigungsgefahr und die Notwendigkeit, die extrem schwachen Widerstandsänderungen möglichst nah am Montageort zu verstärken, um Verfälschungen zu vermeiden.

Ziel der DMS Messung ist in diesem Fall nicht die genaue Bestimmung der von außen wirkenden Kräfte und Momente, sondern die Erfassung von typischen Belastungsverläufen. Aus dem Vergleich der für eine Gangart üblichen Verläufe und den gemessenen Zeitreihen soll dann ermittelt werden, ob, und wenn ja, welche Störung des Ganges vorliegt. Aufgrund dieses eher biologischen Konzeptes ist es auch möglich, die Dehnungsmeßstreifen in einer ungewöhnlichen Art zu verschalten. Die DMS zur Messung von Biegung und Torsion werden zusammen in einer Meßbrücke verschaltet. Mit dieser Kombination ergibt sich nach experimenteller Ermittlung der korrekten Verstärkung ein für die Laufsituationen charakteristisches Ausgangssignal. Durch die Kombination dieses Signals mit den Daten der Aufstandssensoren und der Servoströme wäre es möglich, die Erkennung von Hindernissen zu verbessern und eventuell die Reaktionszeiten zu vermindern. Die Ergebnisse der DMS Messung werden in dieser Arbeit nicht weiter verwendet, stünden aber erweiterten Methoden zur Verfügung.

Naturgemäß müssen die DMS direkt auf das betreffende Bauteil appliziert werden. Wiederverwendbar ist dabei die zugehörige Verstärkerschaltung, die in der Nähe der Meßstelle angebracht wird. Durch entsprechend miniaturisierte Bauteile ist es möglich, die Verstärkerschaltung direkt am Bein zu plazieren.

2.3.4 Inklinometer

Um es den Maschinen zu ermöglichen, in unbekanntem Gelände die Orientierung des Zentralkörpers koordiniert zu beeinflussen, ist es notwendig, die aktuelle Orientierung messen zu können.

Bei dem an den Gehmaschinen verwendeten Sensor handelt es sich um das Modell ADXL202 der Firma Analog Devices. Der ADXL202 ist ein zweiachsiger Beschleunigungssensor, der auch zur Neigungsmessung eingesetzt werden kann. Die Beschleunigung wird über einen Differentialkondensator gemessen. Wie in Abbildung 19(a) gezeigt, ist diese Schaltung aus den zwei feststehenden Platten P_1 und P_3 sowie der horizontal verschieblichen Platte P_2 aufgebaut. Membrane an den beiden Seiten des beweglichen Balkens erzeugen entsprechende Rückstellkräfte. Ändert der mittlere Balken seine Position, so ändert sich die Kapazität der beiden Kondensatoren, die aus P_1 und P_2 bzw. aus P_2 und P_3 gebildet werden.

Diese Kapazitätsänderung wird durch die integrierte Elektronik in die Pulsweitenänderung eines Signals und in eine dazu proportionale Spannung umgewandelt.

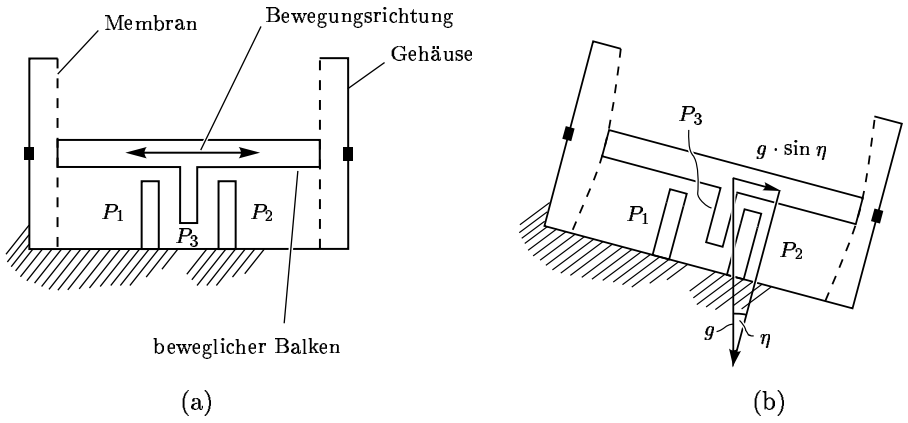


Abbildung 19: Prinzip des Beschleunigungsmessers ADXL202

Bei einer Schräglage des Sensors beeinflußt die Erdbeschleunigung die Lage der mittleren Kondensatorplatte, wie in Abbildung 19(b) zu sehen ist. Diese Verschiebung der Kondensatorplatte wird von dynamischen Effekten überlagert. Da der Sensor nicht in der Lage ist, statische und dynamische Anteile zu trennen, treten insbesondere bei Sprüngen der Eingangsgröße, also der Neigung der Maschine, die Resultate der an der beweglichen Platte wirkenden Trägheitskräfte in Erscheinung. In Abbildung 20 ist die Sprungantwort des Sensors auf eine plötzliche Neigungsänderung von fünf Grad dargestellt. Deutlich ist der Ausschlag des Systems in die entgegengesetzte Richtung sowie der überschwingende Einschwingvorgang selbst zu erkennen. Um das Ausgangssignal des Sensors für die gewünschten Einsatzzwecke verwenden zu können, wird das Signal mit einem RC-Tiefpass mit einer Frequenz von 3,9 Hz gefiltert. Das Ergebnis ist in Abbildung 21 dargestellt. Der gemessene Ausschlag in die Gegenrichtung ist deutlich reduziert und das Signal nähert sich dem Endwert ohne Überschwingen exponentiell an. Die Geschwindigkeit des gefilterten Sensors ist für den geforderten Einsatzzweck völlig ausreichend.

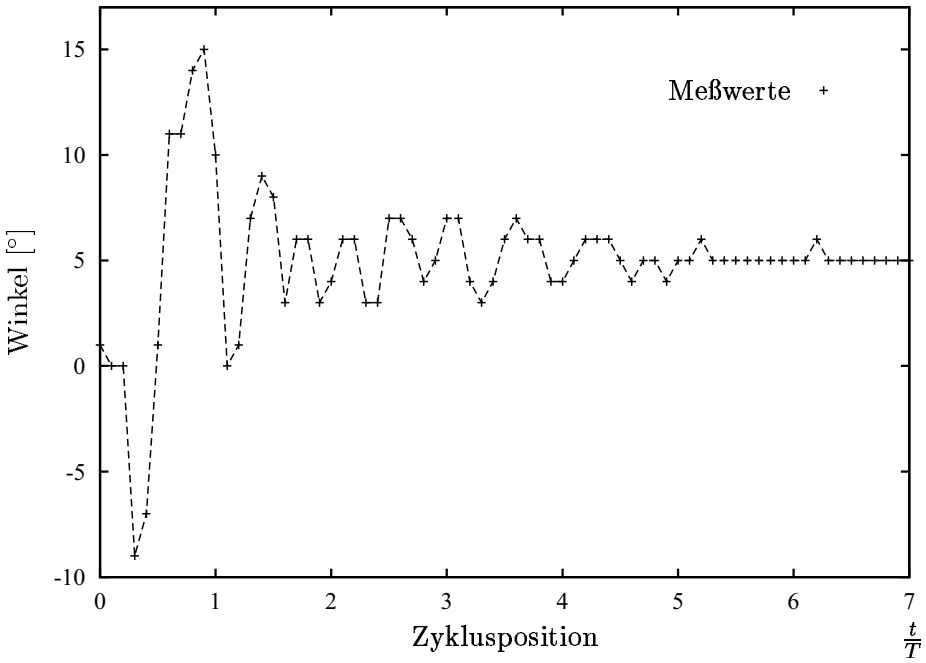


Abbildung 20: Sprungantwort (5°) ungefiltert

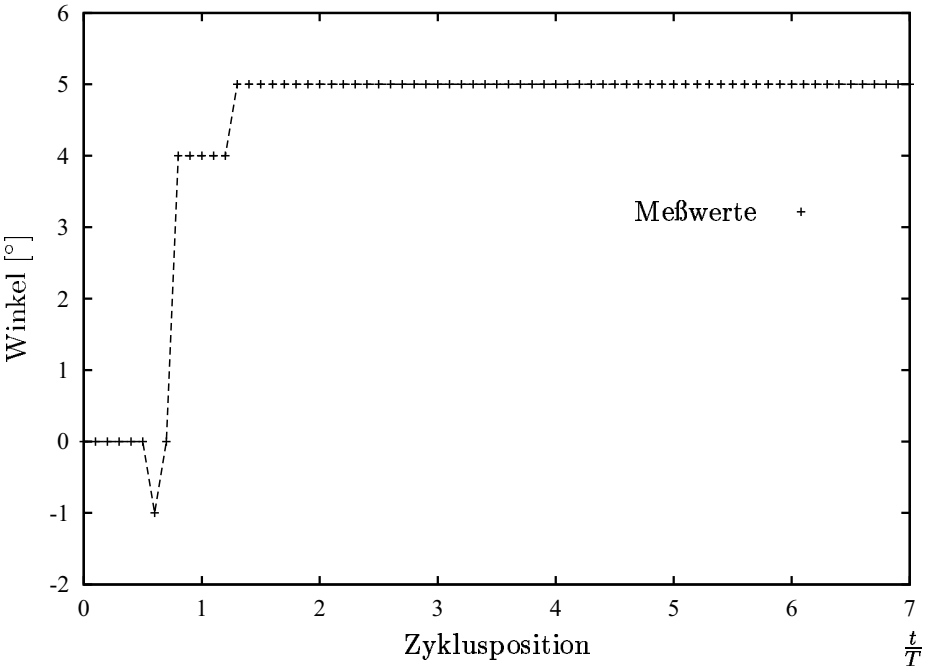


Abbildung 21: Sprungantwort gefiltert mit $T = 0{,}256$ s

2.3.5 Ultraschallsensor

Ultraschallsensoren zählen zu den elektroakustischen Entfernungsmessern. Durch die Ausstrahlung eines kurzen Schallsignals über den Transmitter wird die Messung eingeleitet. Über die Laufzeit, die die an Hindernissen reflektierten Signale benötigen um den Receiver zu erreichen, ist die Entfernungsberechnung für Objekte, die im Bereich der Schallkeule des Sensors liegen, möglich.

Die alternativ in Versuchen verwendeten Sensoren UC2000-30GM-IU-V1 von Pepperl+Fuchs (PuF) und der Polaroid 8665 arbeiteten dabei beide als sogenannte Transponder, daß heißt, Sende- und Empfangseinheit sind in einem Schallkopf integriert. Die verwendeten Transponder arbeiten mit Frequenzen von 175 kHz bzw. 50 kHz, und damit deutlich oberhalb der unteren Grenze des Ultraschallbereichs, die bei ca. 20 kHz liegt.

Die Entfernung eines Hindernisses berechnet sich aus der Laufzeit Δt mit:

$$s = \frac{1}{2} c_{Schall} \Delta t$$

mit der Schallgeschwindigkeit als

$$c_{Schall} = \sqrt{\kappa R T}.$$

Da der Isentropenexponent bei den üblichen Umgebungsbedingungen seinen Wert von $\kappa \approx 1{,}4$ kaum ändert, bleibt das Produkt von κ und der molaren Gaskonstante R praktisch gleich. Damit ist die Schallgeschwindigkeit weitgehend von der Umgebungstemperatur abhängig. Hier liegt der größte Vorteil des Ultraschallsensors von PuF. Während der Polaroid Sensor vor jedem Einsatz entsprechend kalibriert werden muß, bietet der Alternativsensor eine automatische Temperaturkompensation, die auch während des Betriebs nachgeführt wird.

Tabelle 5: Daten der Ultraschallsensoren

	Polaroid Typ 8665	Pepperl+Fuchs UC2000-30GM-IU-V1
φ_{min}[°]	11	10
φ_{max}[°]	19	25
Größe (d × l) [mm]	43 × 12	28 × 113
Gewicht [g]	8	179

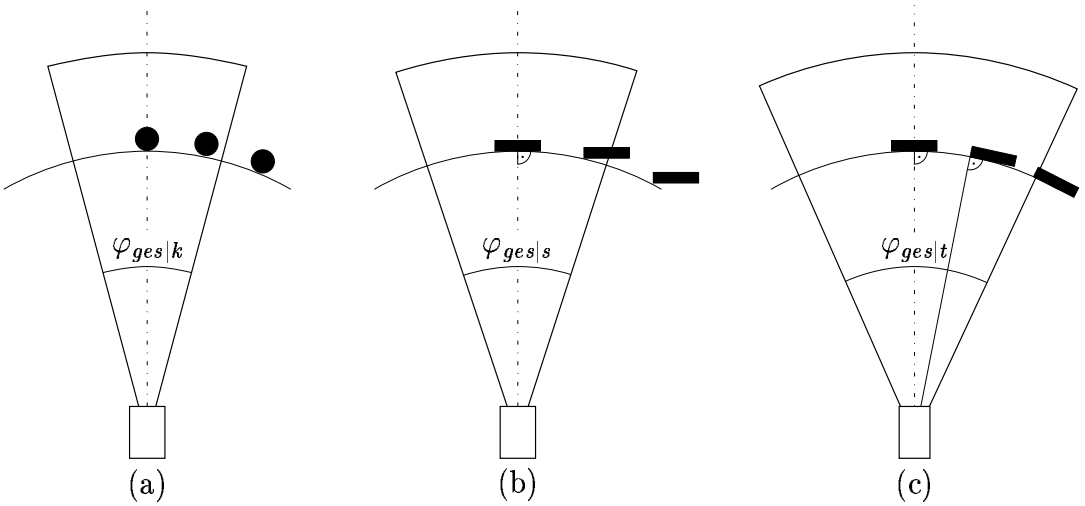


Abbildung 22: Versuchsanordnung zur Bestimmung des Öffnungswinkels mit (a) Zylindern, (b) Quadern senkrecht zur Sensorlängsachse und (c) Quadern tangential zum Radius $r = 750$ mm

Wie sich in einer Reihe von Versuchen herausgestellt hat, bietet der PuF Sensor, trotz der laut Herstellerangaben besseren Kennwerte, ansonsten keine nennenswerten Vorteile bei der Messung. Insbesondere fielen die Unterschiede der Kegelöffnungswinkel φ, die mit Versuchsanordnungen wie in Abbildung 22 bestimmt wurden, geringer aus als erwartet. Aufgrund des deutlich geringeren Gewichtes wurde daher an der Maschine selbst der Sensor der Firma Polaroid eingesetzt. Der Gewichtsvorteil rechtfertigt selbst die schwierigere Auswertung der Daten durch Laufzeitmessung im Vergleich zur einfachen Auswertung einer Spannung proportional zur ermittelten Entfernung bei dem PuF Sensor.

Bei den Versuchen hat sich auch gezeigt, daß die Kennlinie der Sensoren tatsächlich praktisch linear verläuft. Daher ist die Auswertung der Meßsignale ausgesprochen einfach zu bewerkstelligen. Wenn der Sensor mit einem Servomotor drehbar auf der Maschine angebracht wird, ist es somit möglich, einen Bereich von annähernd 180° vor der Maschine zu überstreichen. Dabei muß allerdings berücksichtigt werden, daß der Sensor nur in der Lage ist, Hindernisse ab einer bestimmten Größe zu erkennen. Der Ultraschallsensor dient also hauptsächlich dazu, Kollisionen mit großen, unüberwindlichen Hindernissen zu vermeiden. Zu diesem Zweck wird in Abschnitt 5.3.1 eine einfache Methode zur Umgehung erkannter großer Hindernisse vorgestellt.

3 Kommunikation der Komponenten

Um den Betrieb einer Gehmaschine zu ermöglichen, ist die reibungslose Kommunikation aller beteiligten Komponenten sicherzustellen. Eine schematische Darstellung dieser Komponenten findet sich in Abbildung 23. Auf der untersten Ebene der Datenübertragung steht dabei das Messen und Versenden elektrischer Größen zwischen der Gehmaschine und den entsprechenden Hardwarekomponenten wie Analog/Digital-Wandler, Digitale Input/Output-Karten und Einrichtungen zur Erzeugung pulsweitenmodulierter Signale zur Ansteuerung der Servomotoren.

Dieser Ebene übergeordnet ist die Kommunikation der jeweiligen Rechner mit den genannten Hardwarekomponenten. Diese Rechner ermitteln auf Nachfrage die entsprechenden Meßwerte oder versenden die gewünschten Stellgrößen.

Darüber ist das Koordinationssystem der Gehmaschine angesiedelt. Üblicherweise befinden sich die Kernelemente der Koordination auf einem Rechner. Einzelne, besonders zeitaufwendige Aufgaben können auf andere Rechner ausgelagert werden. Dies bietet sich beispielsweise für aufwendigere Visualisierungen an, um die Ausführungszeit des koordinierenden Rechners nicht zu stark zu beeinträchtigen.

Das aus der Arbeit von [Ame95] vorhandene System sollte auf einer modernen Betriebssystem-Plattform neu aufgebaut werden. Die Anforderungen an die Neugestaltung waren:

- komplette Trennung der Koordination und der Hardwareansteuerung,
- Aufteilung der Hardwareansteuerung in unabhängige Module,
- Bildung von Layern zur Erfüllung der verschiedenen Aufgaben,
- Abstraktion der Hardware für den Benutzer,
- logische Abbildung der Maschinenelemente in der Software,
- allgemeine und komplette Abbildung der Hardwarefähigkeiten in den Schnittstellen zur Hardwareansteuerung,
- Möglichkeit zur Kommunikation zu diesen Modulen sowohl auf dem lokalen System als auch über ein Netzwerk und
- Verwendung bereits vorhandener Bibliotheken, wie z. B. für Neuronale Netze oder Bahnplanung.

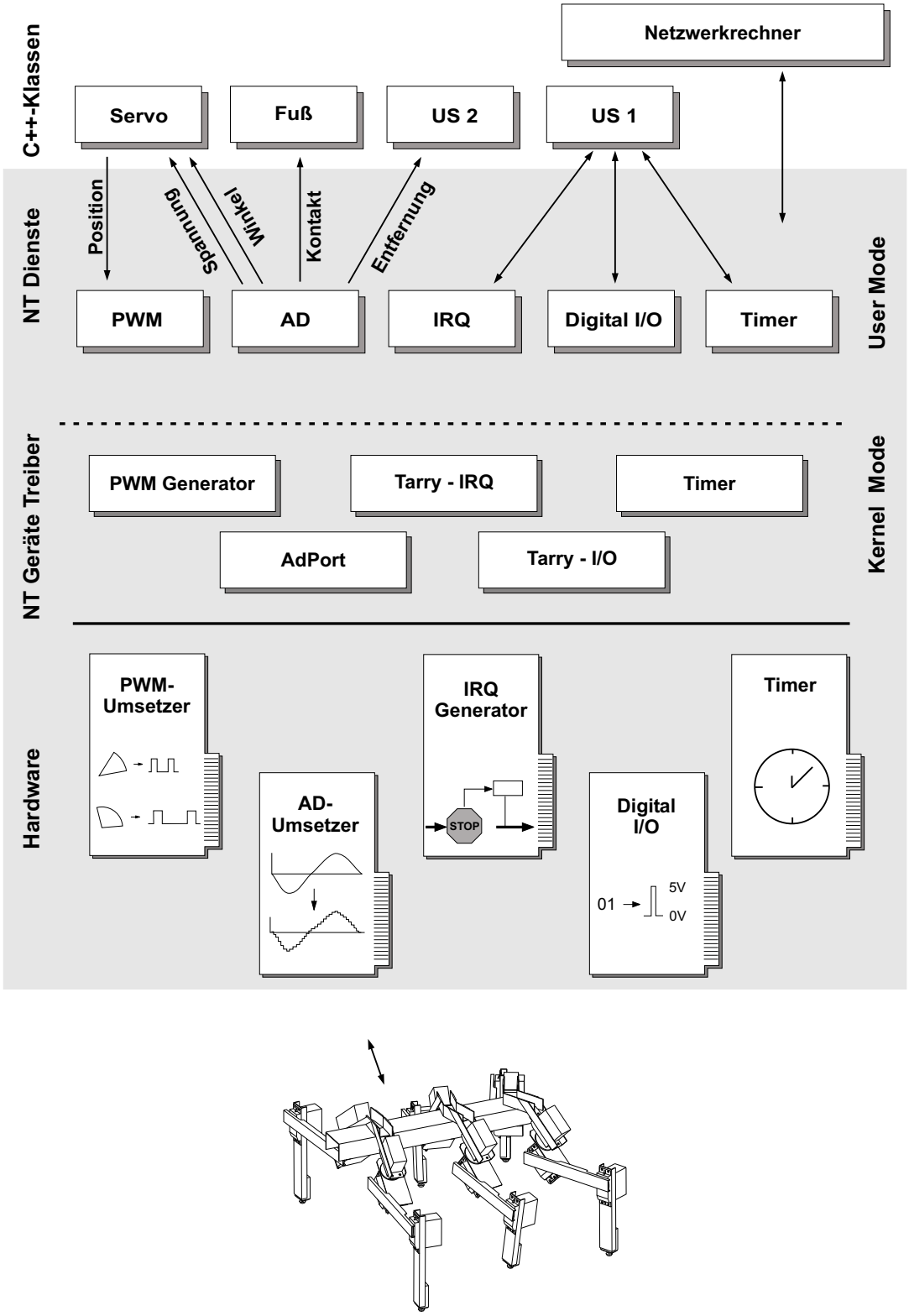


Abbildung 23: Schematische Darstellung der Ansteuerung

Bei der Architektur und der Implementation der verwendeten Module standen also unter anderem Anforderungen der Portierbarkeit und der Netzwerkfähigkeit im Vordergrund. Die einzelnen Module lassen sich dabei in zwei Bereiche einteilen (siehe Abbildung 23). Der erste Bereich beinhaltet die Gerätetreiber, die direkt mit der Hardware kommunizieren sowie die Dienste, die diese Funktionalität nach außen zur Verfügung stellen. Diese Module enthalten zwangsläufig maschinen- und systemabhängigen Programmcode. Im vorliegenden Fall wurde zur Implementation dieser Module Microsoft Windows NT 4.0 gewählt. Die genannten Elemente sind als sogenannte „Device Driver“ beziehungsweise „Services“ ausgeführt. Der zweite Bereich besteht aus allen weiteren Modulen. Diese Module sollen vom Trägersystem, das die Hardwaresteuerung übernimmt, unabhängig sein. Dies beinhaltet insbesondere die Möglichkeit, ein anderes Betriebssystem zu verwenden und die notwendigen Daten über eine hinreichend schnelle Netzwerkverbindung zu übertragen.

Um die notwendige prozeß- und auch rechnerübergreifende Kommunikation der Komponenten zu gewährleisten, waren entsprechende Mechanismen erforderlich. Dabei mußte eine Methode gewählt werden, die auf allen relevanten Systemen zur Verfügung steht und dabei einen möglichst geringen Overhead erzeugt.

Als Übertragungsprotokoll wurde das RPC (Remote Procedure Call) Protokoll gewählt, das im Rahmen der DCE (Desktop Computing Environment) der OSF (Open Software Foundation) standardisiert ist [RT93]. Als zusätzlicher Vorteil ergibt sich dabei, daß die Subsysteme von Windows NT intern sehr intensiv über RPCs mit einem als LPC (Local Procedure Call) oder auch LRPC (Lightweight Remote Procedure Call) bezeichneten Protokoll kommunizieren. Damit ist es möglich, eine gleichzeitig portierbare und netzwerkfähige Kommunikationsstruktur zu verwenden, die auf dem gewählten Zielsystem ausgesprochen effizient umgesetzt ist. Versuche haben ergeben, daß die Geschwindigkeit dieser lokalen Kommunikation auch mit wesentlich weniger universellen Methoden nur unwesentlich zu steigern wäre.

Die Implementierung mit Hilfe von RPCs hat sich als zuverlässig erwiesen und ermöglicht eine kompatible Datenübermittlung zu den hardwarenahen Windows NT Diensten [FGLK98]. Die Kompatibilität konnte durch Koordination der Maschine über Programme unter den Betriebssystemen HP-UX und SUSE Linux über das Netzwerk nachgewiesen werden.

3.1 Beteiligte Hardwarekomponenten

Die eingangs erwähnten Hardwarekomponenten, die mit der Maschine kommunizieren, entstammen drei verschiedenen Bereichen:

- Digitale Input/Output Karten (Digital-I/O),
- Erzeugung pulsweitenmodulierter Signale (PWM-Signale) und
- Analog/Digital-Wandler (A/D-Wandler).

3.1.1 Digital-I/O

Über eine digitale Digital-I/O Karte können digitale Schaltzustände gemessen und erzeugt werden. Die zur Kontrolle der Gehmaschine verwendeten Karten enthalten zudem jeweils mehrere Timer-Bausteine. Dadurch wird es möglich, Schaltereignisse mit dem Starten oder Stoppen von Zählern zu verbinden. Diese Funktionalität kann unter anderem zur Messung von Signallaufzeiten, beispielsweise von Ultraschall-Signalen, verwendet werden (siehe auch Kapitel 2.3.5). Die weiter unten angesprochene PWM-Erzeugung beruht ebenfalls auf Timer-Bausteinen der Digital-I/O Karten.

Die hier verwendeten Karten der Firmen Kolter und Wasco haben jeweils 48 Kanäle und drei Zählbausteine und basieren auf dem Ein-/Ausgabebaustein 82C55 und dem Timer-Baustein 82C54 bzw. 82C53. Die Karten arbeiten mit TTL-Pegeln[2] für die ein- und ausgehenden Signale.

Neben den bereits erwähnten Haupteinsatzgebieten, der Ultraschallmessung und der Implementierung der PWM-Erzeuger, können die Karten zur Messung einfacher Schaltzustände dienen.

3.1.2 PWM-Generator

Die Ansteuerung der verwendeten Servomotoren erfolgt mit Hilfe pulsweitenmodulierter Eingangssignale. Über die Dauer der anliegenden Spannung wird die gewünschte Soll-Position an den internen Servoregler übertragen (siehe auch Abschnitt 2.3.1).

Dabei entspricht der Rechtsausschlag eines Servomotors einer Impulsdauer von ca. 850 μs, der Linksausschlag einer Impulsdauer von ca. 2250 μs. Die Stellgrößen der Servomotoren werden über drei Datenkanäle an die Maschine übertragen. Zu diesem Zweck wird das sogenannte Multiplexing-Verfahren verwendet, bei dem Signale auf einem Kanal nacheinander gesendet werden. Auf der Empfängerseite, der Gehmaschine selbst, werden diese Daten wieder getrennt und an die einzelnen Stellglieder verteilt. Da jeweils sieben Servomotoren über eine Steuerleitung versorgt werden, ergibt sich eine maximale Sendedauer von 15,75 ms bei Vollausschlag aller Motoren. Diese Zeit begrenzt auch den maximal möglichen Takt, mit dem die entsprechenden Winkel neu an die Maschine übermittelt werden können.

[2] Transistor -Transistor Logic (TTL) sind binäre Signale mit einem Pegel von $U_E \leq 0{,}8$ V, $U_A \leq 0{,}4$ V für den *Low*-Pegel und $U_E \geq 2$ V, $U_A \geq 2{,}4$ V für den *High*-Pegel bei einer Betriebsspannung von 5 V.

3.1.3 A/D-Wandler

Die Messung von elektrischen und nichtelektrischen Größen erfolgt in den meisten Fällen mit Hilfe einer elektrischen Spannung, die sich proportional zur Meßgröße verhält. Um diese Spannungen mit einem Digitalrechner weiterzuverarbeiten, werden A/D-Wandler eingesetzt, die diese Spannung in ein quantisiertes, zeitdiskretes digitales Signal umsetzen. Die hier verwendeten Karten und ihre grundlegenden Eigenschaften sollen kurz vorgestellt werden[Sch98].

Die Auflösung eines A/D-Wandlers wird in der einfachsten Form in Bit angegeben. Die für TARRY II verwendeten Umsetzer basieren auf dem Baustein ADC774 und besitzen eine Auflösung von 12 Bit. Daraus resultiert die Quantisierung des Meßbereiches in $2^{12} = 4096$ Werte. Bei einem unipolaren Spannungsbereich von $0 - 5$ Volt, in dem an den Maschinen gemessen wird, ergibt sich damit eine Auflösung von

$$\Delta U = \frac{5\ \mathrm{V}}{2^{12}} = 1{,}22\ \mathrm{mV} = \mathrm{LSB}\ \text{(Least significant byte)}$$

oder, bezogen auf die Maximalspannung

$$A_{\%} = \frac{100\ \%}{2^{12}} = 0{,}024\ \%.$$

Der verwendete Umsetzer arbeitet nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation. Für jeden der sechzehn Kanäle wird eine Wandlungszeit von 7 μs angegeben.

Im Vergleich zur Messung statischer Signale ist die binäre Codierung dynamischer Signale schwieriger. Während der Umsetzzeit des A/D-Wandlers darf sich die Eingangsgröße höchstens um $\frac{1}{2}$ LSB ändern, um das Meßergebnis nicht zu verfälschen. Bei den oben angegebenen Parametern wäre das in diesem Fall eine Änderung von höchsten 0,61 mV in der Wandlungszeit. Um diese Problematik zu umgehen, kann die Verwendung des „Sample and Hold“ hilfreich sein. Dieser Modus gestattet es, die Eingangsspannung vor der Messung zu speichern und dann den danach gemessenen Wert zu wandeln. Die Gesamtmeßzeit verlängert sich dabei allerdings um die Einschwingzeit der Speicher. An der verwendeten Meßkarte sind je vier solcher „Sample and Hold“ Kanäle vorhanden.

Versuche mit der Messung der Stellwinkel haben allerdings gezeigt, daß auf die Verwendung der Zwischenspeicherung verzichtet werden kann. Die Servomotoren bewegen sich verhältnismäßig langsam, so daß die Abweichungen zwischen den beiden Messungen nicht relevant waren.

3.2 Kommunikation der Rechner mit den Hardwarekomponenten

Um die Kommunikation des Rechners mit den verwendeten Hardwarekomponenten zu ermöglichen, müssen entsprechende Treiber zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund der breiten Verfügbarkeit von standardisierten Hardwarekomponenten aus

dem Bereich der PC-Technologie, und um die Weiterverwendung der bereits für TARRY I eingesetzten Meßkarten zu ermöglichen, kam als Rechnerhardware damit nur die PC-Plattform in Frage.

Zum Zeitpunkt der Neukonzeption der Softwarearchitektur Ende 1996 boten sich zur Verwendung auf dieser Plattform nur Microsoft Windows NT 4.0 und Linux als anspruchsvolle Betriebssysteme an. Beide bieten die notwendigen Grundlagen, um das gewünschte System aufzubauen. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Werkzeuge und Informationen zur Treiberprogrammierung fiel die Wahl auf Windows NT. Die vorgestellte Architektur ließe sich aber auch komplett auf einem Linux System realisieren.

Da für die bereits bei TARRY I verwendete Meßkarten keine Kernel Treiber für Windows NT erhältlich waren, ist die entsprechende Software am Fachgebiet Mechanik der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg erstellt worden. Sie muß im sogenannten *Kernel Mode* des Prozessors betrieben werden. Lediglich von hier aus ist es möglich, direkt auf die Register und Speicher der Hardware zuzugreifen. Allerdings erfordert dies deutlich umfangreichere Kenntnisse als die gängige Programmierung im *User Mode*. Fehlerhafte Module im *Kernel Mode* bringen das System in der Regel zum Stillstand, da es hier bei Erkennen von ungültigen Manipulationen die Gesamtintegrität bedroht sieht und die Arbeit beendet. Ebenso ist die Fehlersuche selbst um einiges aufwendiger, da viele der üblichen Werkzeuge hier nicht zur Verfügung stehen. Die Funktionalität der erzeugten Treiber beschränkt sich daher auf die unbedingt notwendigen Elemente. Die Informationen zur Treiberprogrammierung entstammen hauptsächlich dem dazu notwendigen Microsoft Windows NT Device Driver Kit (DDK) [MS-96], CUSTER [Cus93], BAKER [Bak97] sowie VISCAROLO und MASON [VM99].

Um die Funktionalität der Hardwaretreiber allen beteiligten Rechnern zur Verfügung zu stellen, wird eine Zugriffschicht in Form von Windows NT Diensten verwendet. Sie arbeiten unabhängig von angemeldeten Benutzern und sind den bekannteren „Demons“ unter Unix vergleichbar. Die Dienste stellen Schnittstellen zur Verfügung, die den Zugriff auf die Hardwaretreiber kapseln. Dies hat mehrere Vorteile. Zum einen ist es auf dieser Ebene relativ leicht möglich, einen Zugriff über das Netzwerk vorzusehen. Die bereits erwähnten RPCs können hier einfach implementiert werden. Zum anderen ist mit Hilfe dieser Dienste die Forderung, den verhältnismäßig unkomfortablen direkten Zugriff auf die Treiber zu verhindern und durch einen bequemeren, leichter zu kontrollierenden Zugriff mittels der entsprechenden Dienste zu ersetzen, leicht erfüllbar. Die erhöhte Bequemlichkeit ist durch die wesentlich einfachere Programmierung und Wartung der Dienste, die sich im *User Mode* befinden, auch deutlich einfacher zu erreichen. Die Aufteilung in tatsächliche Kommunikation mit der Hardware durch die Kernel-Treiber und Bereitstellung von Zusatzfunktionalitäten durch die entsprechenden Dienste erreicht zudem eine gute funktionale Trennung der Elemente und eine Vereinfachung der Programmierung.

```
[ uuid(AB845E53-0F05-11d1-A06C-00A024B66774), version(1.0) ]
interface MeServoControl
{
 void MeServoBeginSession
  ([in] handle_t hBinding, [out] error_status_t* error);

 void MeServoEndSession
  ([in] handle_t hBinding, [out] error_status_t* error);

 short MeServoPing
  ([in] handle_t hBinding, [out] error_status_t* error);

 void MeServoSet
  ([in] handle_t hBinding, [out] error_status_t* error,
   [in, size_is(NumberOfValues)] short pWhich[],
   [in, size_is(NumberOfValues)] float Winkel[],
   [in] short NumberOfValues);

 void MeServoSetLegs
  ([in] handle_t hBinding, [out] error_status_t* error,
   [in] float Winkel[18]);

 short MeServoGetSignalPwm
  ([in] handle_t hBinding, [out] error_status_t* error);

 short MeServoSetDeltaPwm
  ([in] handle_t hBinding, [out] error_status_t* error, [in] short DeltaPwm);
}
```

Abbildung 24: Beispiel einer RPC Schnittstellenbeschreibung

3.3 Kommunikation mit den Diensten

Wie bereits angesprochen, kommunizieren die Dienste, die den Zugriff auf die Hardware kapseln, über Remote Procedure Calls mit den in der Hierarchie weiter oben liegenden Modulen. Für die RPCs wird ein genau bezeichnetes Interface beschrieben, in dem verbindlich festgelegt wird, welche Funktionen zur Verfügung stehen. Die Deklaration der Funktionen erfolgt in einer ähnlichen Form wie in der Programmiersprache C. Im Gegensatz zu C ist für die Deklarationen der IDL (Interface Definiton Language) die Größe der Datentypen und ihre Speicherung genau festgelegt [Fin94][RT93]. Aufgrund der beschreibenden Schnittstelle wird mit Hilfe eines Compilers C-Programmcode erzeugt, der dann mit dem restlichen Quellcode übersetzt und gebunden wird. Der maschinell erzeugte Code implementiert sowohl die prozeßübergreifende Kommunikation als auch die Verbindung über das Netzwerk und die dazu eventuell notwendige Ausrichtung der Datentypen. Als Kommunikationsprotokoll können unter anderem NetBEUI, IPX, UDP oder auch das bei TARRY in der Regel verwendete TCP/IP-Protokoll zum Einsatz kommen. Wird lediglich ein einzelner Windows NT Rechner zur Kontrolle eingesetzt, so kann das nur lokal verfügbare LRPC Protokoll als schnellste Alternative verwendet werden.

```
#include <iostream.h>
#include <fstream.h>

#include <neuralnet/ForwardNetwork.h>
#include <lapackpp/FloatVec.h>

#include <mechlib/PaceMaker.h>
#include <mechlib/Servo.h>

MePaceMaker PaceMaker(100);

int main(int argc, char** argv)
{
MeServo Servo
 ("tarry.mechanik.uni-duisburg.de");

if (!Servo.IsOk() ) {
     cout << "Keine Servo Verbind.";
     return 1;
     }

LaFloatVec InVec(5);
LaFloatVec ServoAngles(18);

NNForwardNetwork VL("VL.net");
NNForwardNetwork ML("ML.net");
NNForwardNetwork HL("HL.net");
NNForwardNetwork VR("VR.net");
NNForwardNetwork MR("MR.net");
NNForwardNetwork HR("HR.net");
NNForwardNetwork* Networks[6] =
    {&VL, &ML, &HL, &VR, &MR, &HR};

cout << "xDot, yDot, Drehung, Hoehe";
 cin >> InVec[0];
 cin >> InVec[1];
 cin >> InVec[2];
 cin >> InVec[3];

while (TRUE) {
 InVec[4] = PaceMaker.sin();
 InVec[5] = PaceMaker.cos();
 for (Leg=VL; Leg <= HR; Leg++) {
   Networks[Leg]->Propagate
     (InVec,
      ServoAngles(LaRange(Leg*3, 2+Leg*3)));
   }
  Servo.SetLegs(ServoAngles.data)
  Servo.GetSendSignal();
  PaceMaker++;
  }

return 0;
}
```

Abbildung 25: Beispiel eines einfachen Programms zur neuronalen Kontrolle von TARRY II

Die Darstellung der Gehmaschine durch die beschriebenen Dienste ist bezogen auf die im Rechner installierten Hardwarekarten. Um eine möglichst einfache Programmierung zu ermöglichen, ist es sinnvoll, Elemente wie Servomotoren, Fußtaster, Ultraschallsensoren etc. mit ihrer Funktionalität in C++-Klassen zu modellieren. Diese Einheiten verwalten dann die Zugriffe auf die notwendigen Dienste und implementieren Zusatzfunktionalitäten wie beispielsweise Zwischenspeicherung oder Umrechnung und Korrektur mit Hilfe von Kalibrierungsdaten. Diese Möglichkeit ist in Abbildung 23 durch die C++-Klassen auf dem lokalen und dem externen Rechner angedeutet.

Ein Beispiel hierfür ist der Dienst zur Ansteuerung der Servomotoren, dessen RPC-Schnittstellendefinition in Abbildung 24 dargestellt ist. Die Motoren selbst werden über pulsweitenmodulierte Signale angesteuert. Für den Bediener oder Programmierer sind die entsprechenden Werte wenig anschaulich und fehlerträchtig. Daher empfängt der Servo-Dienst die gewünschten Stellwinkel in Grad, rechnet sie mit Hilfe eine Kalibrierungstabelle um und sendet die ermittelten Pulsweiten an den Treiber. Dadurch ist es leicht möglich, die Koordinationssoftware durch Anpassung der Kalibrierungsdaten von Neuausrichtungen und Umprogrammierungen der Servomotoren unabhängig zu halten.

Durch diese Abstrahierung ist es möglich, ausgesprochen einfache Programme zur

Koordination zu erstellen. Ein Beispiel für eine einfache neuronale Steuerung findet sich in Abbildung 25.

Sollen externe Rechner dazu dienen, nicht nur Daten zu empfangen und zu visualisieren oder die entsprechenden Dienste direkt anzusprechen, so können problemlos zusätzliche RPC Schnittstellen definiert werden, die die Kommunikation zwischen den beteiligten Einheiten ermöglichen. Dadurch ist es auch möglich, die Ergebnisse mehrerer externer Rechner zusammenzufassen und zu bewerten und erst aufgrund dieser Ergebnisse Daten an die Dienste zu senden.

4 Grundlagen der Gangerzeugung

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur Bewegungskoordination beruht auf einer Abwandlung und Rekombination einfacher bekannter Gangmuster, um daraus die notwendigen Bewegungen zur Bewältigung komplexer Situationen zu generieren.

Um diese Strategie anwenden zu können, müssen für den jeweiligen Roboter die Gangmuster für einfache Bewegungen zur Verfügung gestellt werden können. Dies sollte einen möglichst geringen Aufwand an Rechenzeit erfordern, da die Detektion des unbekannten Geländes und die darauf zu bestimmende Reaktion einen maximalen Anteil an der Gesamtrechenkapazität und -zeit zur Verfügung haben sollen.

Die vorgestellte Kontrollstrategie soll dabei möglichst allgemein verwendbar sein. Das heißt, auch Maschinen, deren Kinematik sich von der der hier vorgestellten Roboter unterscheidet, sollen diese Strategie nutzen können. Um die dazu notwendigen Gangmuster für beliebige Gehmaschinen mit mindestens zwei symmetrischen Beinpaaren berechnen zu können, wurde im Fachgebiet Mechanik die Bibliothek WALKINGLIB entwickelt. Diese Bibliothek bietet die Möglichkeit, kinematisch korrekte Gangmuster für vorgegebene Maschinen zu erstellen. Aufgrund ihrer ausgesprochen generisch angelegten Struktur sind die benötigten Rechenzeiten jedoch relativ hoch. Um einen möglichst großen Zeitanteil eines Schrittzyklus für die Koordination und Adaption der Bewegung zur Verfügung stellen zu können, wurde mit neuronalen *feedforward* Netzen eine Möglichkeit gefunden, eine sowohl schnelle als auch hinreichend genaue Approximation der analytisch erzeugten Gangmuster bereitzustellen. Damit kann der Prozeß der Gangmustererzeugung in zwei Teile zerlegt werden: In die aufwendige Berechnung der Gangmuster und das Training der neuronalen Netze auf der einen Seite sowie die schnelle Approximation dieser Muster mit Hilfe der trainierten neuronalen Netze auf der anderen Seite.

Die Funktionsweisen der WALKINGLIB und der neuronalen Netze werden in diesem Kapitel erläutert. Außerdem wird der Vergleich der jeweils notwendigen Rechenzeiten und der erzielten Genauigkeit präsentiert.

4.1 Gangerzeugung mit der WalkingLib

Bei vielen existierenden Gehmaschinen sind die verwendeten Gangmuster sehr einfach gehalten und teilweise kinematisch nicht korrekt. Neben den Zwangskräften, die dadurch in den Beinen und im Zentralkörper der Maschinen entstehen können, bedeutet das Fehlen einer analytischen Gangmustererzeugung in der Regel auch ein geringeres Repertoire an Gangarten.

Bei TARRY I wurde bereits in der Arbeit von AMENDT [Ame95] Wert auf eine kinematisch korrekte Berechnung harmonisch wirkender Schrittmuster gelegt. Die Form der berechneten Trajektorien orientierte sich dabei am biologischen Vorbild.

Tabelle 6: Gangparameter der WALKINGLIB

Parameter	Beschreibung
v_x	Geschwindigkeit des Zentralkörpers in Längsrichtung
v_y	Geschwindigkeit des Zentralkörpers in Querrichtung
ω_z	Rotationsgeschwindigkeit um die Hochachse der Maschine
h_r	Senkrechter Abstand des Zentralkörperbezugspunktes über der Aufstandsebene
h_l	Maximaler senkrechter Abstand des Fußpunktes über der Aufstandsebene
w_j	Schrittbreite des Beinpaares j
s_j	Verschiebung des Schwingungsmittelpunktes des Beinpaares j
α_x	Neigungswinkel des Zentralkörpers um Längsachse (Rollen)
α_y	Neigungswinkel des Zentralkörpers um die Querachse (Nicken)
Δx	Amplitude der überlagerten Zentralkörperschwingung (Längs)
Δy	Amplitude der überlagerten Zentralkörperschwingung (Quer)
φ_x	Phasenverschiebung der überlagerten Schwingung (Längs)
φ_y	Phasenverschiebung der überlagerten Schwingung (Quer)
T	Zyklusdauer
β_i	Duty-Faktor des Beines i.
ϕ_i	Phase des Beines i

Die dort vorgestellte Berechnungsmethode beschränkte sich jedoch auf den Geradeauslauf und auf Kurven mit großen Radien. Dieser Algorithmus konnte dann auf die beliebige Überlagerung von Bewegungen in die x- und y-Richtung zusammen mit frei wählbaren Kurvenradien erweitert werden. Dadurch war neben dem Seitwärtsgang auch das Drehen auf der Stelle möglich.

Diese Methode der Gangerzeugung blieb aber auf die Kinematik der Gehmaschine TARRY I und einen kleinen Satz von Parametern beschränkt. Zudem war es praktisch nicht möglich, zusätzliche Funktionalität, wie beispielsweise die Ausgabe der Daten in einem anderen Format oder die Optimierung von Gangmustern, zu implementieren. Auch diese Einschränkungen können mit der Bibliothek WALKINGLIB [BFG+98] überwunden werden. Die WALKINGLIB berechnet mit Hilfe der Beschreibung einer Roboterstruktur und der gewünschten Gangparameter die entsprechenden Gangmuster. Die Ergebnisse dieser Berechnung können in verschiedenen Formaten ausgegeben werden, beispielsweise in Form der zugehörigen Gelenkkoordinaten oder als Datensätze zur Berechnung von Animationen.[3]

[3]Die Bibliothek ist auch in der Lage, Gang- oder Strukturparameter einer Maschine hinsichtlich

Die kinematische Beschreibung der Maschine erfolgt mit Hilfe eines C++-Programmes, in dem einfache Elemente wie Gelenke oder Verbindungsstücke auf geeignete Weise parametriert und kombiniert werden. Hiermit ist es möglich, die Geometrie und Kinematik der gewünschten Mechanismen entsprechend zu repräsentieren. Diese Beschreibung dient der WALKINGLIB im weiteren Verlauf als Modell.

Die gewünschte Bewegung wird in Form verschiedener Gangparameter, aufgelistet in Tabelle 6, vorgegeben. Mit ihnen ist es möglich, eine sehr große Palette von Gangarten zu beschreiben und die zugehörigen Gangmuster zu erzeugen.

4.2 Erzeugte Gangmuster

Die Gangparameter können, wie in Tabelle 6 bereits angedeutet, grob in drei Blöcke unterteilt werden. Die Parameter des ersten Blocks ändern Form, Lage und Orientierung der Trajektorien ebenso wie Lage und Orientierung des Zentralkörpers. Die Parameter des zweiten Block wirken sich nur auf die Lage und Orientierung des Zentralkörpers aus. Der dritte Block regelt das Zusammenspiel der einzelnen Beine und beeinflußt dazu die zeitliche Lage und Aufteilung der Trajektorien, verändert diese aber ansonsten nicht.

Je nach Anwendungsfall wird jeweils ein unterschiedlicher Teil der Parameter genutzt. Aus dem zweiten Block dienen die Parameter der überlagerten Schwingungen (Δx, Δy, φ_x und φ_y) hauptsächlich dazu, durch eine Verlagerung des Gesamtschwerpunktes der Maschine die statische Stabilität während des Ganges zu erhöhen. Dies ist besonders für Vierbeiner interessant, da die statische Stabilität dort während der Schwingphasen ein deutliches Problem darstellt, das mit dieser Methode verringert werden kann [BFG+98] [HM00]. Für einen Sechsbeiner sind diese Parameter kaum relevant. Die beiden restlichen Parameter dieses Blockes beeinflussen den Nick- und Rollwinkel des Zentralkörpers. Die Neigung der Maschine wird mit der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Koordinationsmethode allerdings mit anderen Mitteln (vgl. Abschnitt 5.2.2) beeinflußt. Aus den genannten Gründen wird der komplette zweite Parameterblock in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Alle folgenden Erläuterungen gehen davon aus, daß die zugehörigen Parameter zu Null gesetzt sind.

Die Trajektorie eines einzelnen Fußes teilt sich auf in eine Stemm- und eine Schwingphase. Deren Gesamtdauer entspricht der Zykluszeit, die auch als Schrittdauer bezeichnet wird. In der Stemmphase stützt das zugehörige Bein den Zentralkörper und sorgt gleichzeitig für die Lokomotion der Maschine. In der Schwingphase wird der Fuß vom Endpunkt der Stemmphase (*Posterior Extreme Position*, PEP) zum Anfangspunkt der folgenden Stemmphase (*Anterior Extreme Position*, AEP) bewegt. Das Verhältnis der Dauer der Stemmphase zur Schrittdauer stellt den Duty-Faktor

der Kippstabilität zu optimieren. Diese spezielle Funktionalität soll hier aber nicht näher betrachtet werden [FBG+00b].

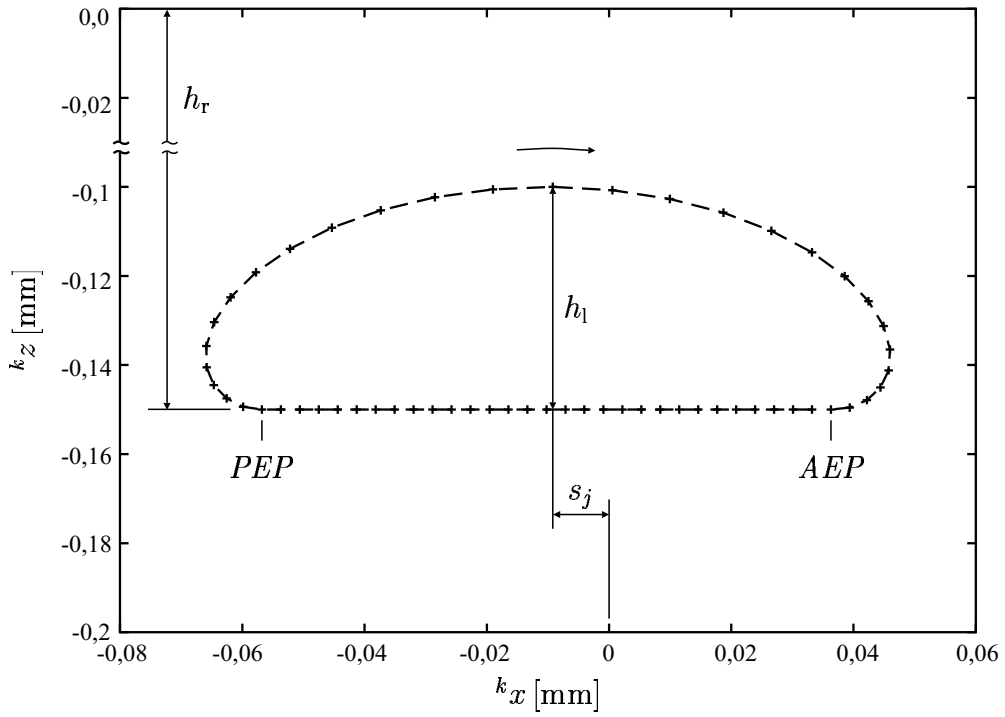


Abbildung 26: Diskretisierte Fußpunkttrajektorie für einen reinen Vorwärtslauf des mittleren linken Beines.

β_i des jeweiligen Beines dar. Die Stemmlinie, die *AEP* und *PEP* verbindet, wird maßgeblich von Parametern v_x, v_y und ω_z bestimmt. Die Körperhöhe h_r und die Schritthöhe h_l sind bei der Berechnung mit der WALKINGLIB für alle Beine gleich.

In der Schwingphase beschreibt der Fuß im Inertialsystem den Weg einer gestauchten Zykloide. Deren Berechnung wird in [BFG+98] beschrieben. Durch die kontinuierliche Bewegung des Zentralkörpers ergibt sich im k-Koordinatensystem des zugehörigen Beines beispielsweise die in Abbildung 26 gezeigte Trajektorie in der x-z-Ebene.

Aus der Kooperation der Beine ergeben sich die unterschiedlichen Gangarten, die durch die Parameter β_i und ϕ_i charakterisiert werden. Die Phasenlage ϕ_i jedes Beines gibt dabei an, an welcher Stelle des Gesamtzyklus die Schwingphase eines Beines beginnt. Die Zyklusdauer bestimmt, in welcher Zeit eine Trajektorie einmal komplett durchlaufen wird und ist für alle Beine gleich.

In der langsamsten Gangart, dem Wellengang, ist zu jedem Zeitpunkt maximal ein Bein in der Schwingphase. Die Maschine hat durch die hohe Zahl der stützenden Beine eine maximale statische Stabilität und Aufnahmemöglichkeit für die größte mögliche Nutzlast. Die Polygone, die durch die Beine in der Stemmphase gebildet werden, sind in Abbildung 27 dargestellt.

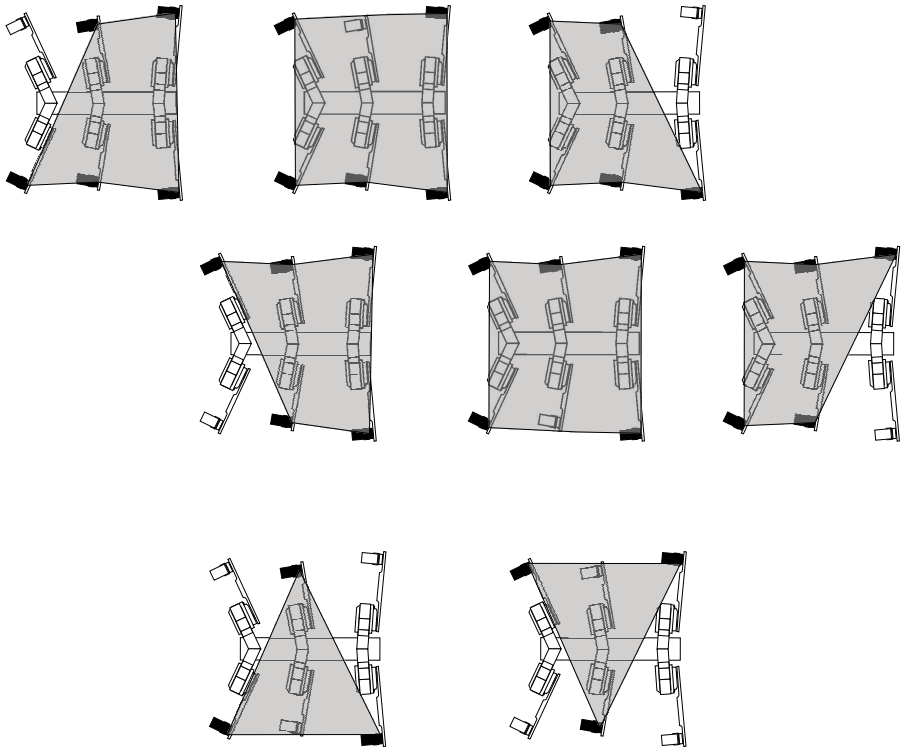


Abbildung 27: Aufstandspolygone (grau) und Beine in der Stemmphase (schwarz) beim Wellengang (a) und Tripod Gang (b)

In der schnellsten Fortbewegungsart, dem Tripod Gang, sind je drei Beine in der Schwing- und drei in der Stemmphase. Das dreieckige Aufstandspolygon wird dabei jeweils von dem statisch stabilen Dreibein, dem sogenannten Tripod, gebildet.

Eine der möglichen Zwischenformen dieser beiden Gangarten ist der Tetrapod Gang. Hier befinden sich jeweils zwei Beine in der Schwingphase, die restlichen vier Beine stützen den Körper. Wie in dem aus der Gangart abgeleiteten Gangdiagramm in Abbildung 28 gesehen werden kann, existieren zwischen dem Wechsel der aufstehenden Beine in der Regel Phasen, in denen alle Beine Bodenkontakt haben.

Neben diesen explizit erwähnten Gangarten können durch die Kombination von Duty-Faktor und Phasenlage beliebige Gangarten erzeugt werden. Somit sind Mischformen der vorgestellten Gangarten realisierbar.

In der im folgenden Kapitel beschriebenen Strategie zur autonomen Bewegungskoordination wird ein Teil der vorgestellten Parameter konstant gehalten. Zur Erzeugung der Trainingsmuster werden lediglich die Geschwindigkeit in x- und y-Richtung, v_{x} und v_{y}, die Rotationgeschwindigkeit ω_{z} um die z-Achse, und die Höhe des Zentralkörpers h_{r} und des Fußes h_{j} variiert. Wegen seiner im Vergleich zu den anderen Gangarten relativ hohen Geschwindigkeit wird nur noch auf den Tripod Gang

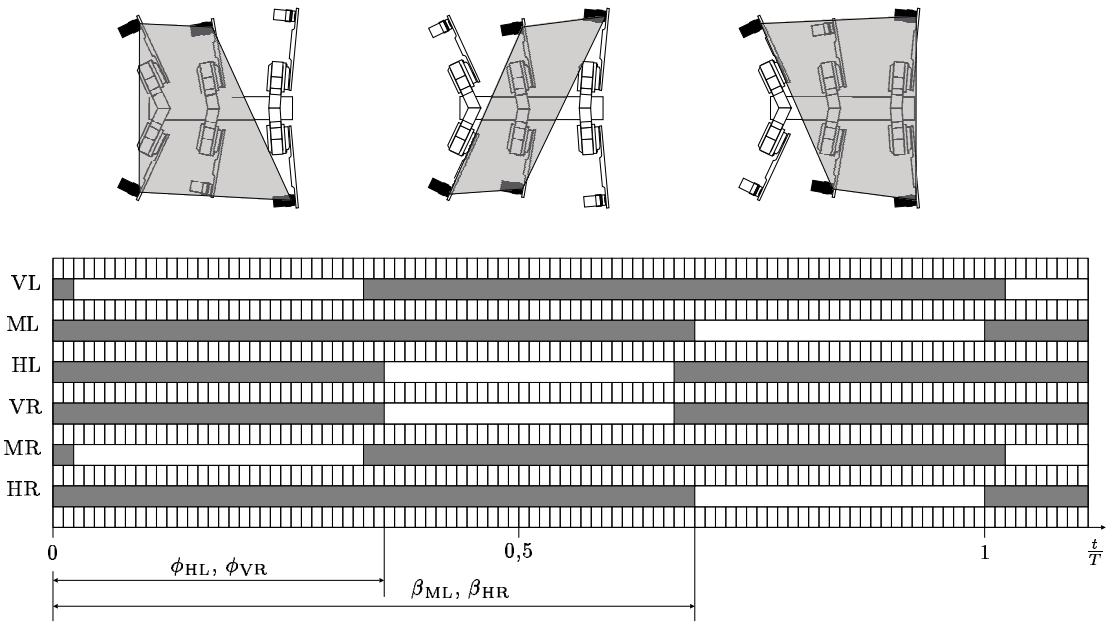


Abbildung 28: Gangdiagramm des Tetrapod Ganges

zurückgegriffen. Die vorgestellten Methoden sind aber auch auf alle andere Gangarten anwendbar.

4.3 Ganggenerierung mit neuronalen Netzen

Die Ganggenerierung mit der WALKINGLIB hat den Nachteil der niedrigen Ausführungsgeschwindigkeit. Um dieses Problem zu umgehen, wird ein Verfahren eingesetzt, für das typische Gangmuster nur vorab analytisch berechnet werden. Diese Muster dienen dann als Trainingsdaten für die Approximation durch neuronale Netzwerke.

Diese Netze haben eine Reihe von günstigen Eigenschaften. Nachdem sie mit einer Auswahl an vorberechneten Ein- und Ausgangswerten auf eine Problemstellung hin trainiert wurden, sind sie in der Lage, auch auf ähnliche, nicht trainierte Eingangsmuster passende Ausgangsdaten zu generieren. Zusammen mit der hohen Ausführungsgeschwindigkeit prädestiniert dieses, als Generalisierungsfähigkeit bezeichnete Verhalten, diese Methode für die gewünschte Nutzung.

Die Verfahren der künstlichen neuronalen Netzwerke entstammen dem Bereich der künstlichen Intelligenz. Sie versuchen, die Informationsverarbeitung von Lebewesen durch eine hohe Anzahl verbundener einfacher Verarbeitungseinheiten, den Neuronen, abstrahiert nachzubilden. Diese Neuronen können mit Hilfe gewichteter und gerichteter Verbindungen untereinander Informationen austauschen.

Jede Zelle kann Signale von anderen Zellen empfangen, weiterverarbeiten und an andere Zellen senden. Es gibt praktisch unbegrenzt viele Möglichkeiten, solche Zellen zu verbinden, um damit Netzwerke aufzubauen. Eine breite Übersicht der verschiedenen Methoden bietet ZELL [Zel94].

In dieser Arbeit sollen nur die sogenannten *feedforward* Netze behandelt werden. Hier werden jeweils mehrere Zellen, auch Units genannt, zu Schichten zusammengefaßt. Es existiert je eine Eingabe- und eine Ausgabeschicht (*input* und *output*). Die Zahl der darin enthaltenen Zellen entspricht der Anzahl der vorhandenen Eingangs- bzw. der gewünschten Ausgangswerte. Zwischen diesen Schichten können sich beliebig viele weitere Schichten befinden. In der Regel sind dies zwei oder mehr. Da diese Schichten nach außen nicht in Erscheinung treten, werden sie auch verdeckte Schichten (*hidden layer*) genannt. In einem *feedforward* Netz laufen die Signale immer nur von der Eingabe- in die Richtung der Ausgabeschicht. Über gewichtete Verbindungen sendet jede Zelle ihr Ausgangssignal zu jeder einzelnen Zelle der nachfolgenden Schicht. Innerhalb einer Schicht existieren keine Verbindungen. Weder werden Schichten übersprungen (*shortcuts*) noch gibt es rückwirkende (*recurrent*) Verbindungen. Ein solches Netz ist in Abbildung 29 dargestellt. Um beispielsweise ein Netz in der dort vorliegenden Konfiguration zu bezeichnen, wird im folgenden die Notation 3-4-4-2 verwendet. Die erste und die letzte Zahl geben die Anzahl der Ein- bzw. Ausgangsneuronen an. Die dazwischenliegenden Zahlen stehen für die Anzahl der Units der jeweiligen verdeckten Schichten.

Die Zellen sind aufgebaut, wie in Abbildung 30 dargestellt. Die Arbeit einer solchen Zelle teilt sich in drei Bereiche, die Propagierung, die Aktivierung und die Ausgabe auf.

Durch die Propagierungsfunktion wird die Summe der gewichteten Signale aller Zellen der Vorgängerschicht ermittelt. Bei n Vorgängerzellen für die Zelle m gilt dann:

$$\text{prop}_m = \sum_{i=1}^{n} o_i w_{im}$$

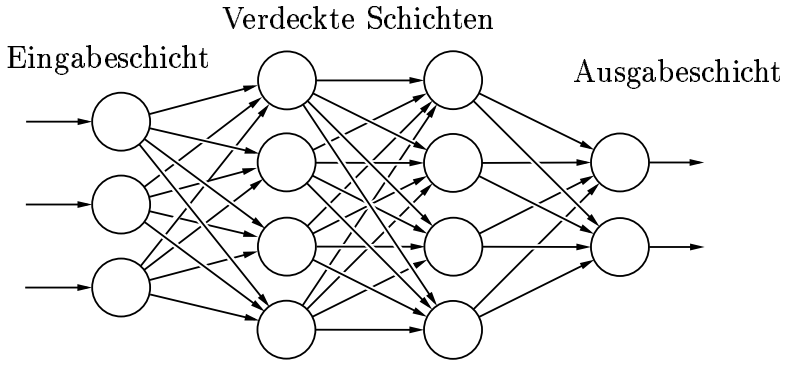


Abbildung 29: Beispiel eines *feedforward* Netzwerkes

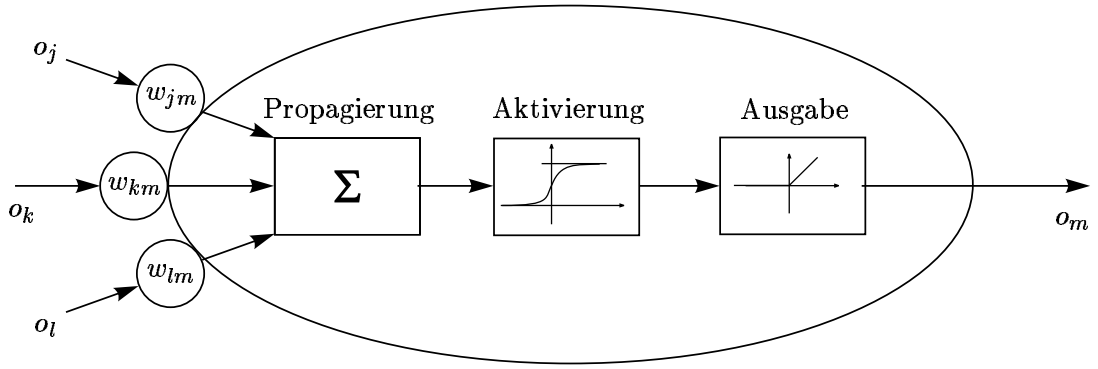


Abbildung 30: Unit eines neuronalen Netzes

Die Aktivierungsfunktion $\text{akt}_m = f(\text{prop}_m)$ legt die Stärke der Zellenaktivierung fest. Eine oft verwendete Funktion ist die sigmoide (s-förmige) logistische Funktion,

$$\text{akt}_m = \frac{1}{1 + e^{-\text{prop}_m}} \quad ,$$

die in den hier verwendeten Netzwerken ebenfalls zum Einsatz kommt.[4]

Als Ausgabefunktion kommen ebenfalls verschiedene Möglichkeiten in Betracht, hier wird allerdings die einfachste Möglichkeit, die Identität

$$\text{aus}_m = \text{akt}_m$$

verwendet.

Das Training der Netzwerke erfolgt mit einem überwachten Verfahren mit Hilfe des sogenannten *back-propagation*-Algorithmus. Das Netz zu trainieren bedeutet, die Gewichte der einzelnen Zellverbindungen so zu adaptieren, daß auf die vorgegebenen Eingangswerte der Trainingsmuster die zugehörigen Ausgangswerte möglichst gut approximiert werden. Zu diesem Zweck werden p Beispiele bereitgestellt, die die zu lösende Aufgabe möglichst gut repräsentieren. Für ein Netz mit μ Eingangs- und ν Ausgangsunits besteht ein Beispiel dabei aus einem Eingangsvektor $\mathbf{i}$, mit $\mathbf{i} \in \mathbb{R}^\mu$ und dem Vektor der zugehörigen Ausgangswerte $\mathbf{t}$, mit $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^\nu$.

Die Eingangswerte werden durch das Netz propagiert. Dabei wird durch die Berechnungsvorschriften der einzelnen Zellen und die Gewichte der Verbindungen der Ergebnisvektor $\mathbf{o}$, mit $\mathbf{o} \in \mathbb{R}^\nu$ ermittelt. Die Differenz zwischen dem berechneten und dem erwarteten Ausgangsmuster $(\mathbf{o} - \mathbf{t})$ wird nun genutzt, um die Verbindungsgewichte so zu verändern, daß sich diese Differenz für das gerade präsentierte Muster

[4]Die Form der Aktivierungsfunktion ist hauptsächlich für das Training der neuronalen Netze von Bedeutung.

verringert. Die Gewichtsanpassung findet dabei entgegengesetzt zur üblichen Richtung der Informationsausbreitung statt, woher sich auch der Name *back-propagation* des Verfahrens ableitet. Die Gewichtsanpassung wird mit Hilfe eines generalisierten *delta error* Verfahrens [Köh90] vorgenommen. Hiermit wird bei der Anpassung der Gewichte berücksichtigt, wie stark die entsprechende Verbindung an dem jeweiligen Ergebnis beteiligt war. Je größer der Einfluß einer Verbindung, umso größer die entsprechende Adaption.

Bei der Anpassung der Gewichte handelt es sich um ein gradientenbasiertes minimieren des absoluten quadratischen Fehlers E. Bei einem Netz mit p Trainingspaaren und ν Ausgabeunits berechnet sich dieser mit

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{p} \sum_{j=0}^{\nu} ({}^{i}o_j - {}^{i}t_j)^2 \quad ,$$

wobei ${}^{i}o_j$ und ${}^{i}t_j$ dem j-ten Element des i-ten Ausgangs- bzw. Ergebnisvektors entspricht.

Wie bei allen gradientenbasierten Verfahren besteht auch hier die Möglichkeit, lediglich ein lokales Minimum in der Fehlerfunktion zu ermitteln. Da die Trainingsmuster in zufälliger Reihenfolge präsentiert werden, kann es sinnvoll sein, den Lernvorgang zu wiederholen, falls das Ergebnis nicht konvergiert. Da die Gewichtsanpassung jeweils nur auf der Basis eines einzelnen Beispiels erfolgt, ist der Verlauf des Fehlers E in der Regel nicht monoton fallend.

Durch die sogenannte Lernrate wird die Stärke aller Gewichtsanpassungen beim Lernen proportional beeinflußt. Nach großen Anpassungsraten zu Beginn des Lernvorgangs, wenn die von den Gewichten gebildete Konnektionsmatrix zufällig besetzt ist, wird durch deren Absenken die Änderungsgeschwindigkeit verringert. Dadurch wird bei fallendem Gesamtfehler die Anpassung der Gewichte schwächer, was Ausreißer abmindert. Zusätzlich kommt ein sogenannter Momentumterm zum Einsatz. Mit diesem Term wird durch die Berücksichtigung der Änderung des vorangegangenen Lernschrittes verhindert, daß eine Gewichtsanpassung die vorherige Modifikation direkt wieder aufhebt.

Das Training läuft so lange, bis entweder eine vorgegebene Fehlergrenze für E unterschritten oder die vorgegebene Anzahl von Trainingsschritten erreicht wurde. Über den Lernfehler kann relativ gut erkannt werden, ob die zu lernenden Werte eventuell nicht eindeutig abgebildet werden oder Unstetigkeiten enthalten. Dies äußert sich in der Regel in einer ungewöhnlich frühen Stagnation des Lernfehlers. Fehler in den Ausgangsdaten lassen sich mit diesem Mittel oft erkennen.

Ob ein Training zum Erfolg geführt hat, läßt sich insbesondere mit dem Vergleich des absoluten Lernfehlers E mit dem Generalisierungsfehler beurteilen. Der Generalisierungsfehler G wird analog zu E berechnet. Zur Ermittlung von G wird auf

einen Satz von q Generalisierungsmustern zurückgegriffen, die in der gleichen Art wie die Trainingsmuster erzeugt werden, aber Muster enthalten, deren Werte „zwischen“ denen der Lernmuster liegen. Die Anzahl der Generalisierungsdaten sollte dabei deutlich größer sein als die der Trainingsdaten.

$$G = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{q} \sum_{j=0}^{\nu} ({}^{i}o_j - {}^{i}t_j)^2 \quad .$$

Da in die beiden Werte die unterschiedliche Anzahl der Muster mit einfließt, bietet es sich an, auf die bezogenen Größen zurückzugreifen, um leichter vergleichen zu können.

$$\overline{E} = \frac{1}{p} E \quad \text{und} \quad \overline{G} = \frac{1}{q} G$$

Mit Hilfe des Generalisierungsfehlers läßt sich prinzipiell beurteilen, wie sich das Generalisierungsverhalten des Netzes im Vergleich zu den gelernten Werten darstellen wird. Lern- und Generalisierungsfehler sollten in den gleichen Größenordnungen liegen. Weichen diese Fehler stark voneinander ab, sollten die Netzparameter oder die zu lernenden Muster überarbeitet werden.

Am Ende des Trainingsvorganges ist das aus den präsentierten Trainingsmustern abgeleiteten „Wissen“ des neuronalen Netzes in den Gewichten der Zellverbindungen repräsentiert.

Als Implementierung künstlicher neuronaler Netze ist in dieser Arbeit die sogenannte NeuroLib eingesetzt worden. Diese in C++ programmierte Bibliothek ist ebenfalls im Fachgebiet Mechanik der Universität Duisburg entstanden und im Rahmen der Arbeit von Kleutges [Kle99] ausführlich vorgestellt worden.

Die steigende Rechenleistung bei PC's wirft nun die Frage auf, ob der Geschwindigkeitsgewinn durch die Verwendung neuronaler Netze immer noch notwendig oder zumindest sinnvoll ist. Eventuell wäre es möglich, die WalkingLib Bibliothek online zu nutzen. In diesem Fall würden die Muster direkt zur Laufzeit den Erfordernissen entsprechend erzeugt. Die vorherige Mustererzeugung und das Training der neuronalen Netze würden entfallen. Dabei soll auch überprüft werden, welche Genauigkeitsverluste durch den Netzeinsatz in Kauf genommen werden müßten. Dazu werden zuerst die Ein- und Ausgangsparameter der Netze näher vorgestellt, um danach die gewünschten Vergleiche anstellen zu können.

4.4 Neuronale Netze zur Erzeugung der Stellwinkel

Die im nächsten Kapitel vorgestellte Methode zur Bewegungskoordination verwendet ein neuronales Netzwerk je Bein zur Berechnung der Konfigurationen. Dadurch

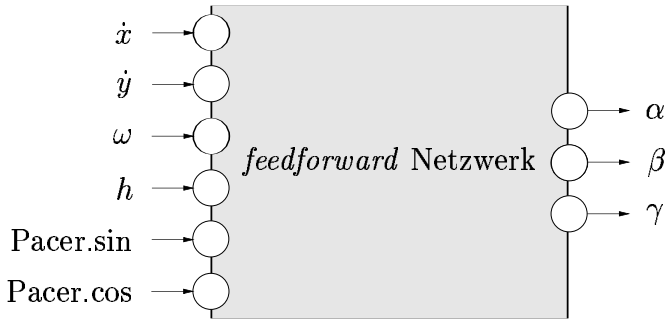


Abbildung 31: Ein- und Ausgabewerte der neuronalen Netze

ergeben sich bereits die Ausgangsgrößen, die den α-, β- und γ-Winkeln des zugehörigen Beines entsprechen. Die Netze werden mit periodischen Zyklen der verschiedenen Gangarten trainiert. Die Zahl der zur Unterscheidung verwendeten Eingangsparameter wird im Gegensatz zur WALKINGLIB deutlich reduziert. Während dort, wie in Tabelle 6 angegeben, sechzehn Parameter zum Einsatz kommen, finden als Eingang für die neuronalen Netzwerke, nur noch sechs Parameter Verwendung. Diese Eingangsgrößen sind neben den Geschwindigkeiten $\dot{x}$ und $\dot{y}$, der Rotationsgeschwindigkeit ω um die z-Achse und der Körperhöhe h_r das charakterisierende Wertepaar eines Schrittmachers. Dieser Schrittmacher (siehe Abschnitt 4.5) dient als Taktgeber, um die aktuelle Position im Schrittzyklus zu bestimmen. Ein entsprechendes Netz ist in Abbildung 31 angedeutet.

Die größte Zahl der Parameter der WALKINGLIB wird nur indirekt verwendet. Dadurch, daß die Bibliothek mit allen Parametern zur Berechnung der Trainingsdaten verwendet wird, fließt aber der komplette Satz in die trainierten Gangmuster mit ein. Werte wie Nick- und Rollwinkel oder die überlagerten Schwingungen kommen dabei allerdings nicht mehr als Veränderliche vor, sondern wirken nur als Konstanten in den Gangmustern.

4.5 Schrittmacher

Bei den trainierten Gangmustern handelt es sich um periodische Daten mit der Zykluszeit T. Um die aktuelle Position in diesem Zyklus als Eingang eines Netzwerkes zu verwenden, wird ein Schrittmacher als Taktgeber eingesetzt. Er ist in Form eines umlaufenden Zeigers implementiert, wie er in Abbildung 32 zu sehen ist. Um eindeutige Eingänge für das neuronale Netz zur Verfügung stellen zu können, wird das Paar der Sinus- und Cosinus-Werte des Zeigerwinkels verwendet.

Die Rotationgeschwindigkeit des Zeigers $\dot{\varphi}(t)$ beeinflußt die Zyklusdauer. Die Geschwindigkeiten, mit denen die neuronalen Netze trainiert werden, beziehen sich

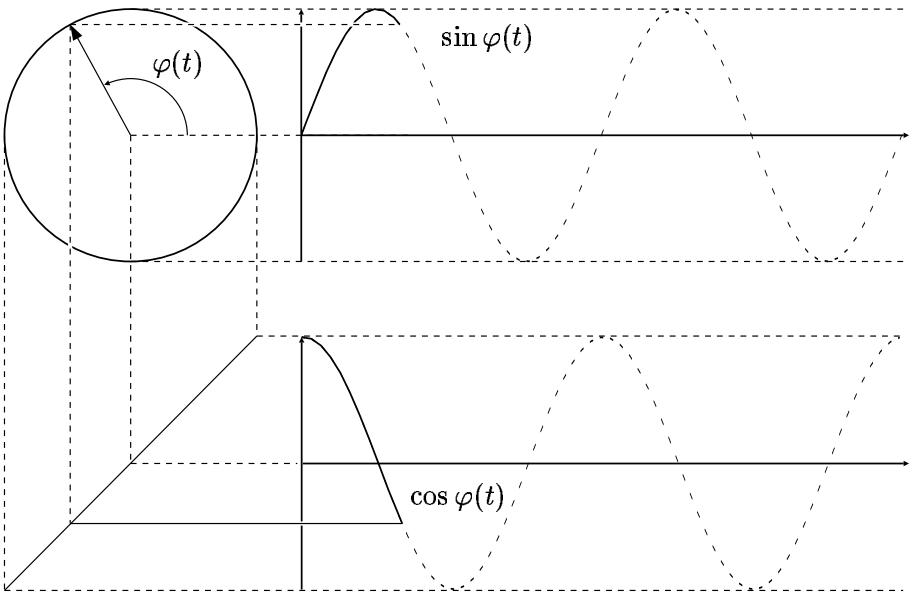


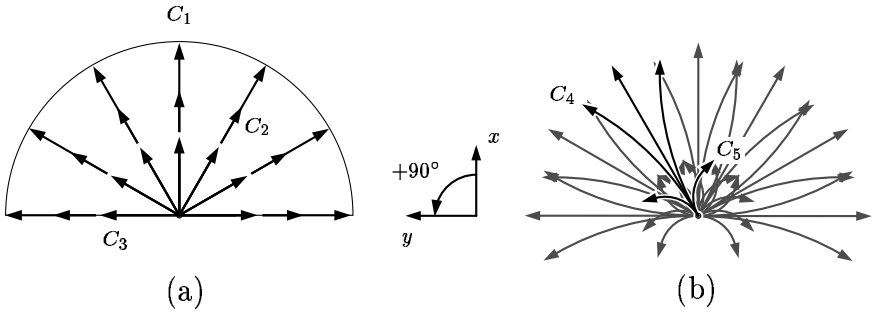
Abbildung 32: Graphische Darstellung eines Schrittmachers und der daraus abgeleiteten Eingangswerte für die neuronalen Netze

dabei auf eine feste Zykluszeit, mit der die Lernmuster erzeugt worden sind. Diese Zykluszeit wird üblicherweise zu $T = 2$ s gesetzt. Eine Umdrehung des Zeigers entspricht einem vollständigen Zyklus dieser Länge. Durch Beschleunigung oder Verlangsamung der Zeigergeschwindigkeit wird die Zykluszeit, und damit die Geschwindigkeit der Maschine, entsprechend skaliert. Die Schrittlängen der Trajektorien bleiben dabei erhalten.

4.6 Lern- und Generalisierungsmuster

Zum Training der Netzwerke werden Lernmuster zur Verfügung gestellt, die die Lösung der Aufgabenstellung repräsentieren. Günstig gewählte Muster resultieren in Netzwerken mit niedrigem Lern- und Generalisierungsfehler, ohne dabei unnötig umfangreich zu sein. Die Lernmuster werden mit der WALKINGLIB vorab berechnet. Die verwendeten Mustersätze entstehen aus den verschiedenen Vorgaben von möglichen Gangrichtungen, überlagerten Rotationen und Körperhöhen der Maschine.

Neben einem skalaren Geschwindigkeitswert, der für alle Mustersätze identisch ist, werden für die Richtungen, die Drehgeschwindigkeit und die Körperhöhe jeweils Minimal- und Maximalwerte sowie die Anzahl der Schritte vorgegeben. In Abbildung 33 sind die Werte, die sich aus den Parametern der Tabelle 7 ergeben angedeutet. Dabei enthält Abbildung 33(a) die sieben Richtungen mit je drei Geschwindigkeiten,



C_i	x	y	ω
1	1,0	0,0	0,0
2	0,6	-0,35	0,0
3	0,0	0,4	0,0
4	0,6	0,86	0,1
5	0,6	0,86	-0,2

Abbildung 33: Grafische Darstellungen der Muster aus Tabelle 7.

während in Abbildung 33(b) die überlagerten Rotationen bei der maximalen Geschwindigkeit angedeutet werden. Die in der Abbildung enthaltene Tabelle gibt die Parameter verschiedener Kurven in diesen Graphiken an. Aus den x- und y-Werten ergeben sich über einen zusätzlichen Faktor die Translationsgeschwindigkeiten der Gehmaschine.

Nach diesem Schema ist ein Lernmustersatz erstellt worden, dessen Parameter der Tabelle 8 entnommen werden können. Die Gesamtanzahl der enthaltenen Muster beläuft sich auf 375.

Um das Generalisierungsverhalten der trainierten Netzwerke beurteilen zu können, ist ein möglichst großer Datensatz erforderlich. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, werden diese Muster mit den in Tabelle 9 enthaltenen Parametern gebildet und erzeugen insgesamt 38.400 Varianten.

Für jedes einzelne dieser Muster wird eine zyklische Trajektorie, analog zu der in Abbildung 26 dargestellten, erzeugt. Jede dieser Kurven wird aus 50 diskreten Punkten bzw. den zugehörigen Beinkonfigurationen gebildet. Damit ergeben sich für die Muster insgesamt 18.750, 36.750 bzw. 1.920.000 einzelne Ein- und Ausgangskombinationen.

Tabelle 7: Muster zur grafischen Darstellung in Abbildung 33

Parameter	min.	max.	Schritte
Geschwindigkeit[1]	0,4	1,0	3
Richtung[Grad]	-90	+90	7
OmegaDot[1]	-0,2	+0,2	5
Höhe[m]	0,15	0,15	1
Anzahl der Muster			105

4.7 Training und Genauigkeit der Netzwerke

Eine Eigenschaft der neuronalen Netzwerke ist, daß die gelernten Werte zwar sehr gut angenähert werden können, in der Regel aber nicht genau erreicht werden. Die Güte dieser Näherung ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Netzgröße und -struktur bestimmen ebenso wie die günstige Auswahl der Trainingsdaten die Genauigkeit der Ausgabewerte. Besonders interessant sind dabei Reaktionen des Netzwerkes auf nicht gelernte Eingangswerte. Wie bereits erwähnt, kann dieses Verhalten in einer skalaren Form bereits über den bezogenen Lernfehler $\overline{E}$ und den Generalisierungsfehler $\overline{G}$ während des Trainings beobachtet werden.

Bei der Beurteilung der Genauigkeit der neuronalen Netzwerke sollte beachtet werden, daß sie bereits seit mehreren Jahren erfolgreich zur Erzeugung der Gelenkwinkel der Gehmaschine TARRY I eingesetzt worden sind. Dieses Wissen kann insbesondere dazu dienen, die hier ermittelten Fehlergrößen zu beurteilen, wobei auch die in Abschnitt 2.2.2 beschriebene Elastizität berücksichtigt werden sollte. Einige der ermittelten Positionierungsfehler wirken auf den ersten Blick relativ groß. Aber bereits ein Blick auf die zugrundeliegenden Winkelfehler zeigt, daß die Abweichungen in den Gelenken relativ gering sind und damit ein Großteil dieser entstehenden Fehlstellungen von der Elastizität des Mechanismus und dem Gelenkspiel aufgenommen werden kann.

Bisher sind die gelernten Netze und ihre Fehler nach insgesamt vier Kriterien beurteilt worden:

- Größe des absoluten Lernfehlers beim Training des neuronalen Netzes,
- Abweichung der trainierten Winkel von der Referenzvorgabe,
- Augenschein und
- Vergleich der gelaufenen Kurvenradien mit den erwarteten Radien.

Die bisherigen Beurteilungskriterien sollen überprüft und erweitert werden. Dabei soll das Augenmerk auf den beiden ersten, „theoretischen“ Methoden liegen. Die praktischen Methoden beurteilen neben der Güte der Ausgangsdaten zu einem Großteil die Eigenschaften der gesamten Versuchsanordnung. So können zum einen, wie bereits oben erwähnt, Fehler in den Mustern ausgeglichen werden, zum anderen werden durch die Maschine und deren Steuerung neue Fehler eingebracht.

Um zuerst eine günstige Netzwerkgröße zu ermitteln, wurden Netze verschiedener Größe mit den vorhandenen Lernmustern trainiert und gleichzeitig mit den Generalisierungsmustern überprüft. Für die Muster der Tabelle 8 ist der Verlauf der bezogenen Fehler eines 6-15-15-15-3 Netzes in Abbildung 34 aufgetragen. Der Lernfehler $\overline{E}$ verläuft gut, was auf prinzipiell korrekte Daten ohne Sprünge und mit

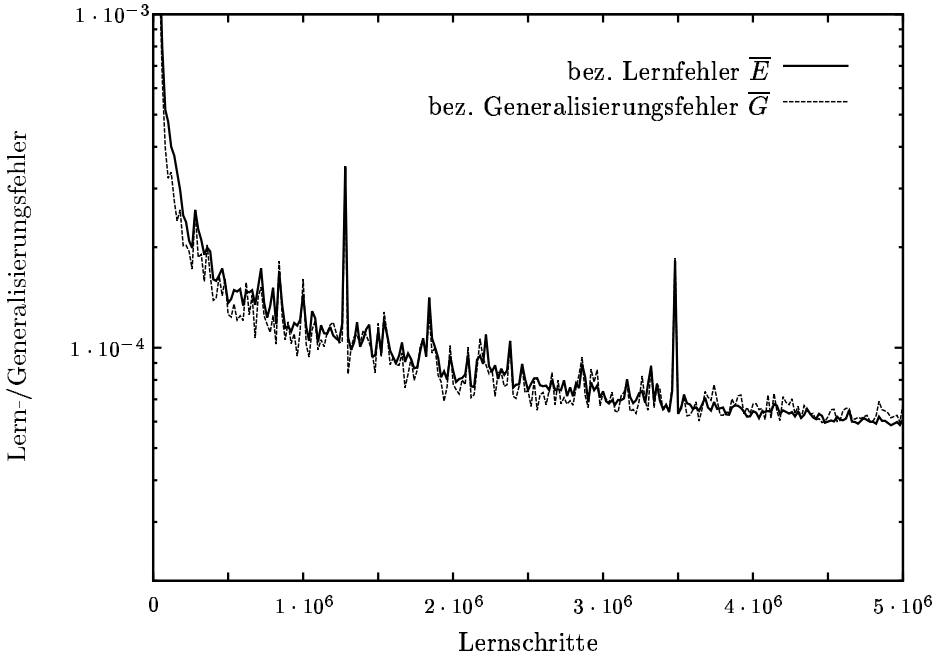


Abbildung 34: Bezogener Lern- und Generalisierungsfehler beim Training mit einem 6-15-15-15-3 Netzwerk

eindeutigen Mustern hinweist. Dazu verläuft der Lernfehler weitgehend parallel zu dem Generalisierungsfehler $\overline{G}$, der mit Hilfe der in Tabelle 9 angegebenen Daten ermittelt wird.

Um nun die Genauigkeit der Netze weiter zu steigern, ist es möglich, die Anzahl der Neuronen des Netzwerkes zu erhöhen. In Abbildung 35 ist der Lernvorgang mit den gleichen Lern- und Generalisierungsdaten für ein 6-30-30-30-3 Netz dargestellt worden. Dabei kann man erkennen, daß sich sowohl der Lern- als auch der Generalisierungsfehler verbessert haben. Allerdings ist gleichzeitig ein Auseinanderdriften

Tabelle 8: Lernmuster

Parameter	min.	max.	Schritte
Geschw.[1]	0,1	1,0	3
Richtg.[°]	-90	+90	5
Omega[1]	-0,2	+0,2	5
Höhe[m]	0,08	0,18	5
Anzahl der Muster			375

Tabelle 9: Generalisierungsmuster

Parameter	min.	max.	Schritte
Geschw.[1]	0,1	1,0	10
Richtg.[°]	-90	+90	20
Omega[1]	-0,2	+0,2	12
Höhe[m]	0,08	0,18	16
Anzahl der Muster			38.400

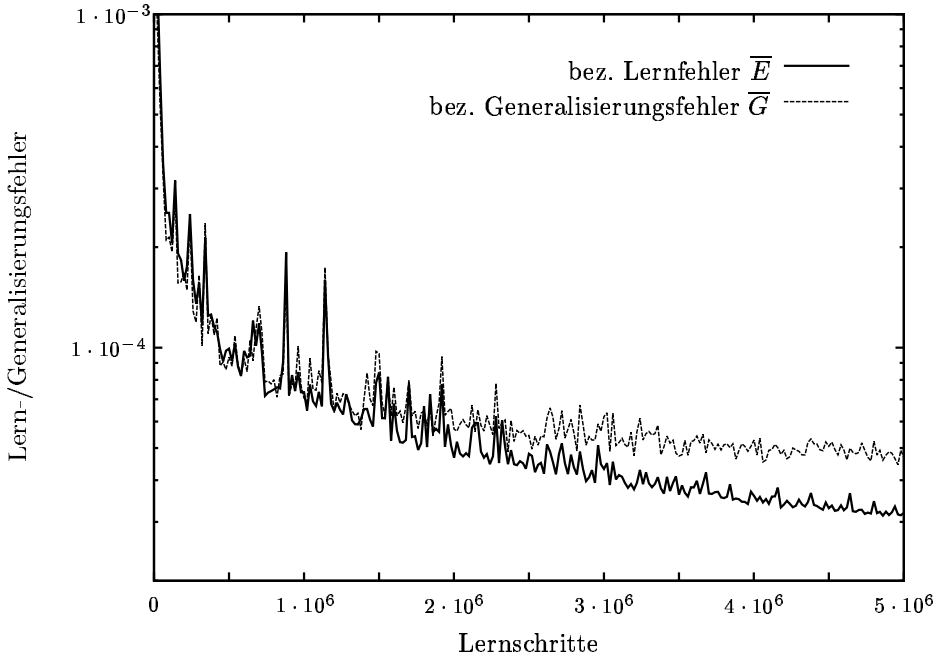


Abbildung 35: Bezogener Lern- und Generalisierungsfehler beim Training mit einem 6-30-30-30-3 Netzwerk

der beiden Kurven zu beobachten. Dies ist ein Effekt, der auch als „Auswendiglernen“ bezeichnet wird und bei dem das Netzwerk mit zunehmender Größe in der Lage ist, die Ein- und Ausgangskombinationen selbst zu lernen, woraufhin sich der Generalisierungsfehler nicht mehr in diesem Maße mitverbessert.

Das Auseinanderlaufen von $\overline{E}$ und $\overline{G}$ setzt bereits bei Netzen mit nur geringfügig größeren verdeckten Schichten ein. Daher wurde für die weiteren Experimente das kleinere der oben beschriebenen neuronalen Netze verwendet, mit dem eine ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Rechenzeit erreicht wird.

Zur Untersuchung der Genauigkeit bietet es sich an, zuerst die Gelenkwinkel als gelernte Ausgangswerte einer näheren Betrachtung zu unterziehen. Sucht man in dem Ergebnis des in Abbildung 34 dargestellten Lernvorgangs nach dem Parametersatz, dessen Ausgabe die größte Abweichung $({}^io_j - {}^it_j)^2$ enthält, findet sich eine maximale Abweichung von 5,7° in den trainierten und von 6,7° in den generalisierten Mustern. Die analytischen und approximierten Winkelverläufe für dieses Generalisierungsmuster sind in Abbildung 36 dargestellt. Die maximale Abweichung liegt bei den Winkeln des β-Gelenkes vor.

Die reale Ausgabefunktion wird durch die Vorwärtskinematik der Maschine gebildet. Daher ist das eigentlich gewünschte Ergebnis die korrekte Positionierung des Fußes. Da die Winkel und Winkelfehler je nach Gelenk und Konfiguration unterschiedlich

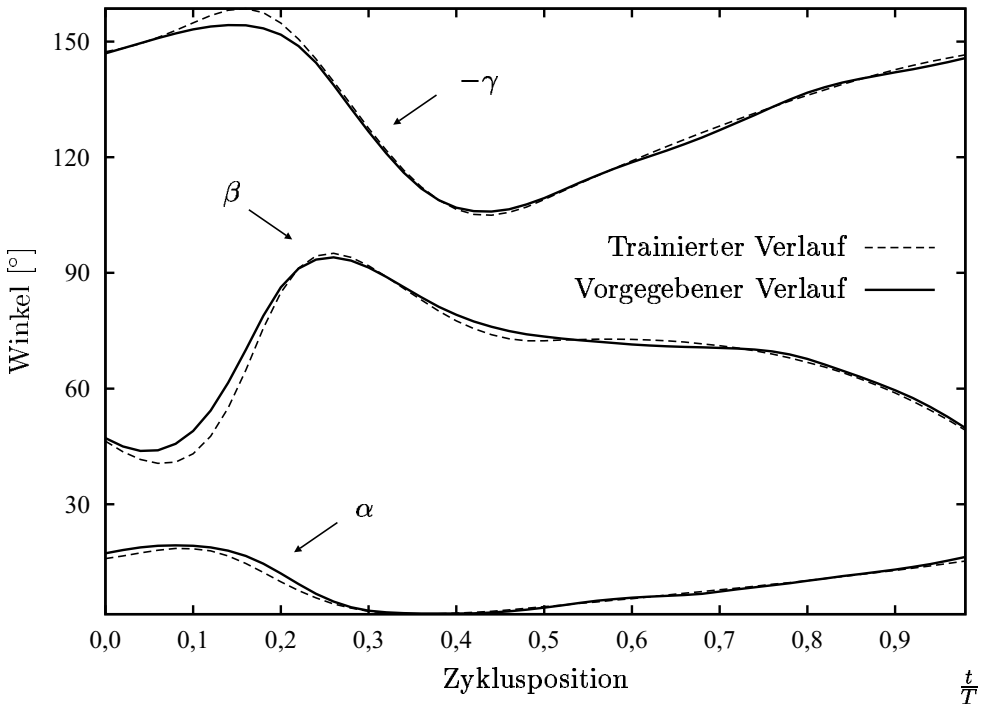


Abbildung 36: Gelernte und vorgegebene Winkelverläufe für das Muster mit dem größten Winkelfehler

in die Position des *Tarsus* eingehen, ist es sinnvoll, statt der Winkel die Soll- und Istwerte der Fußposition zu vergleichen.

Dazu werden für die Lern- und Generalisierungsdaten die kompletten Zyklen der Gelenkwinkel eines Beines sowohl analytisch als auch durch das neuronale Netz berechnet. Über die Vorwärtskinematik, die von der WALKINGLIB mit dem Modell von TARRY II zur Verfügung steht, wird die Differenz der Fußpositionen bestimmt, die sich aus den beiden Konfigurationen ergeben. Für jeden Zyklus wird die maximale Länge dieses Differenzvektors festgehalten. In Abbildung 37 ist die Verteilung dieses Fehlers in aufsteigender Sortierung dargestellt. Als größte Abweichung kann dabei ein Abstand von 0,0136 m festgestellt werden.

Aus der nicht abbgebildeten unsortierten Verteilung kann ein Zusammenhang zwischen den Differenzen und den Eingangsparametern erkannt werden. Durch die Analyse dieses Zusammenhangs ließe sich die Zahl der Lernmuster optimieren, um auch mit wachsender Netzgröße genauere Ergebnisse zu erzielen, bei denen Lern- und Generalisierungsfehler ähnlich verläuft.

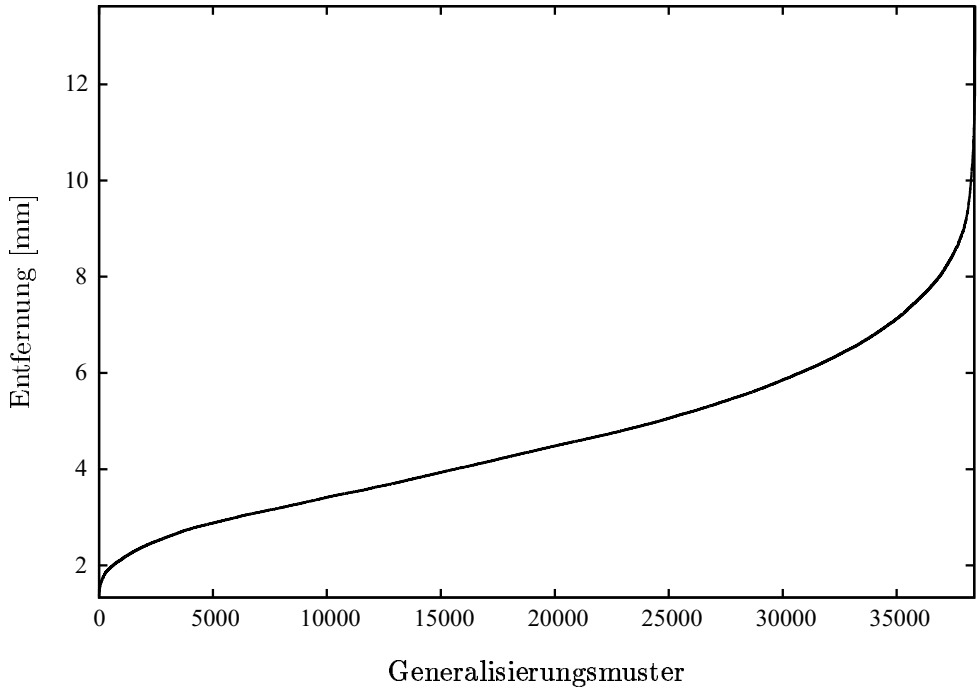


Abbildung 37: Verteilung des maximalen kartesischer Positionierungsfehler eines Beines mit den Mustern der Generalisierungsdaten

4.8 Geschwindigkeitsvergleich

Das Kriterium, das für einen hier verwendeten Gangmustererzeuger erfüllt sein muß, ist seine ausreichende Geschwindigkeit. Um eine flüssige Bewegung zu ermöglichen, darf die Berechnungsdauer einen bestimmten Wert nicht überschreiten. Diese maximale Dauer ist abhängig von der Frequenz der Ansteuerung und ihrem möglichen Anteil am Gesamttakt.

Der bisher vorgegebene Takt liegt bei ca. 50 Hz. Um eine noch flüssigere Bewegung zu ermöglichen, wird für die Zukunft eine Erhöhung dieses Taktes auf ca. 100 Hz angestrebt. Für jeden Takt steht also eine Rechenzeit von max. 20 ms, für die beschleunigte Version bis herunter auf 10 ms, zur Verfügung. Die Gangerzeugung sollte hierbei einen Anteil von weniger als 33 % haben. Damit ergibt sich eine angestrebte Dauer von maximal 3,3 ms.

Bei dem Vergleich muß beachtet werden, daß die Qualität der von der WALKINGLIB berechneten Gangmuster gleichbleibend ist. Die von den neuronalen Netzen ausgegebenen Werte weisen in ihrer Genauigkeit durch ihre Abhängigkeit von der Netzgröße indirekt auch eine Abhängigkeit von der aufgewendeten Rechenzeit auf. Aus diesem Grund werden hier die Rechenzeiten der WALKINGLIB mit den Rechenzeiten und den Genauigkeiten neuronaler Netze verschiedener Größe gegenübergestellt.

Tabelle 10: Vergleich der Rechenzeiten

Methode	Zeit[ms]	Faktor
WALKINGLIB	4,46	1,0
NN 6-09-09-09-3	0,51	8,7
NN 6-15-15-15-3	0,73	6,1
NN 6-22-22-22-3	1,08	4,1
NN 6-30-30-30-3	1,59	2,8

Um den Zeitaufwand zu vergleichen, werden für ein einzelnes Bein die 38.400 Generalisierungsmuster aus Tabelle 9 mit je 50 diskreten Beinkonfigurationen berechnet und die dazu notwendige Zeit t_{ges} gemessen.

Als Vergleichswert ist die durchschnittliche Zeit zur Berechnung von sechs Beinkonfigurationen, also der notwendigen Stelldaten für einen Taktschritt, herangezogen worden[5]. Dabei kann davon ausgegangen werden, daß sowohl bei der WALKINGLIB als auch bei den neuronalen Netzen bei der Berechnung einer einzelnen Konfiguration kaum Abweichungen von der durchschnittlichen Rechenzeit t_i auftreten.

Es gilt $t_i = \frac{t_{ges}}{38.400 \cdot 50}$ oder für alle Beine $t_{\text{Taktschritt}} = \frac{6\, t_{ges}}{38.400 \cdot 50} = \frac{t_{ges}}{320.000}$.

Aus den in Tabelle 10 aufgetragenen Rechenzeiten wird ersichtlich, daß die analytischen Berechnungen in den Bereichen der verwendeten Netzwerkgröße um ein Vielfaches langsamer sind. Da deren Dauer die festgelegte Grenze überschreitet, ist es sinnvoll, die bisher verwendete neuronale Ansteuerung weiter zu nutzen, insbesondere da sich deren Ungenauigkeiten bereits als tragbar erwiesen haben. Aufgrund der ausreichenden Genauigkeit der Approximation sollte der relative Geschwindigkeitsvorteil der neuronalen Netze auch weiter genutzt werden, selbst wenn die Rechenzeit der WALKINGLIB durch eine Verbesserung der Hardware den geforderten Wert unterschreiten könnte.

[5] Alle angegebenen Rechenzeiten sind mit dem TARRY Kontrollrechner ermittelt worden. Dieser Rechner ist ausgestattet mit einem Intel Pentium Pro Prozessor mit 200 MHz und einem Hauptspeicher von 80 MB.

5 Adaptive Bewegungskoordination

Um eine autonome Fortbewegung in unstrukturierter Umgebung zu ermöglichen, sollen Gangmuster für die Fortbewegung in einfachem Gelände geeignet abgeändert und rekombiniert werden. Dazu wird eine Grundmenge einfacher Gangarten ausgewählt. Die ausgesuchten Gangmuster werden auf passende Weise parametriert, um die spätere Auswahl möglichst einfach zu gestalten. Wie in Kapitel 4 beschrieben, ist für jedes Bein ein neuronales Netzwerk mit den gewählten Eingangsgrößen und den sich daraus ergebenden Ausgangsgrößen trainiert.

Mit dieser Basis ist die Maschine bereits in der Lage, sich im Rahmen der trainierten und generalisierten Gangmuster in ebenem Gelände fortzubewegen. Um nun auch Mobilität in einem unstrukturierten Umfeld zu ermöglichen, müssen die Gangmuster einzelner oder aller Beine entsprechend modifiziert werden. Dazu ist es notwendig, die Eingangswerte der neuronalen Netze der jeweiligen Situation entsprechend anzupassen. Die Anpassung ist dabei so aufgebaut, daß die Elastizität der Roboterstruktur und die Ungenauigkeiten der Sensorik und der neuronalen Netze auf geeignete Weise mit einbezogen wird. Dies geschieht mit Hilfe lokaler und globaler Mechanismen, die durch sogenannte „künstliche Reflexe“ oder durch planende Module ausgelöst werden.

In diesem Kapitel wird zuerst das prinzipielle Konzept Bewegungskoordination vorgestellt. Im Anschluß daran wird die Architektur erläutert und deren Eingriffsmöglichkeiten skizziert. Die Darstellungen der künstlichen Reflexe und der planenden Module schließen das Kapitel ab.

5.1 Das Koordinationskonzept der Gehmaschine

Im Gegensatz zur WALKINGLIB können bei der neuronalen Steuerung auch die Parameter, die ansonsten für die gesamte Maschine gelten, für jedes Bein einzeln verstellt werden. Dadurch ist es möglich, mit den Gangmustern, die für die Bewegung in einfachem Gelände erzeugt worden sind, durch geeignete Rekombination auch unstrukturiertes Gelände zu bewältigen. Der Eingangsparameter h eines Netzes ergibt sich bei den Trainingsdaten aus der Körperhöhe h_r der Maschine. Betrachtet man diesen Wert isoliert für ein einzelnes Netzwerk, so kann er ebenso als lokale Höhe des zugehörigen Beines aufgefaßt werden. Durch die unabhängige Modifikation des Schrittmachers der einzelnen Beine lassen sich außerdem deren Geschwindigkeit und Phasenlage zueinander beeinflussen. Eine getrennte Änderung der Rotationsgeschwindigkeit ω ist in der Regel nicht sinnvoll. Für die Abwandlung der Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung, die sich auf die Schrittlänge auswirken, gibt es begrenzte Einsatzmöglichkeiten, die allerdings bei den hier vorgestellten Methoden nicht genutzt werden.

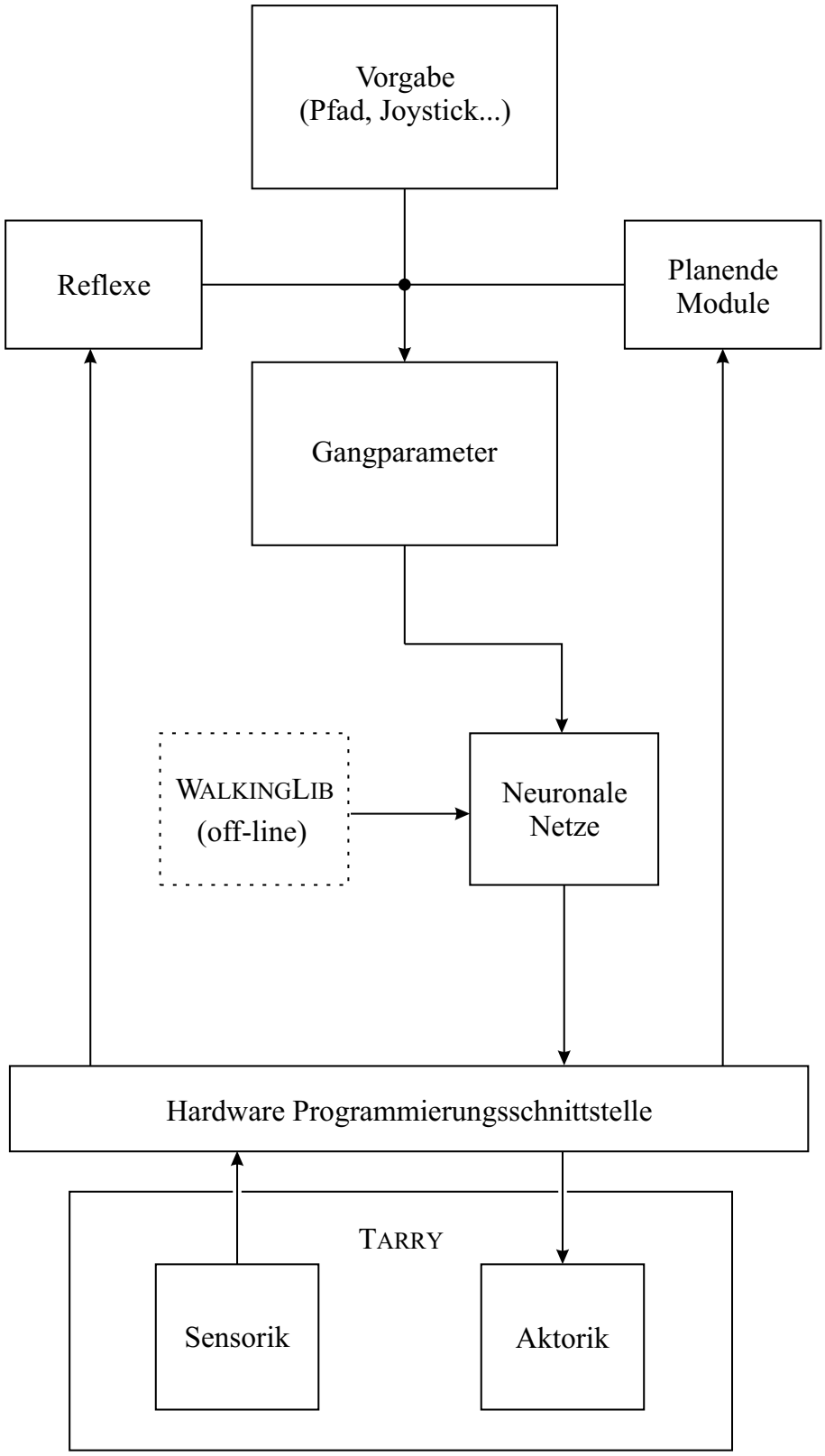


Abbildung 38: Datenfluß bei der TARRY Gehmaschine

Der Aufbau der zugehörigen Koordinationsarchitektur ist in Abbildung 38 dargestellt. Aus den Vorgaben, beispielsweise durch einen Joystick oder durch Standardwerte, werden die in Abschnitt 4.4 erläuterten vereinfachten Gangparameter hergeleitet. Diese dienen als Eingangsmuster für die sechs neuronalen Beinnetzwerke. Die von den Netzen erzeugten Sollwinkel werden über die in Kapitel 3 beschriebenen Mechanismen an die Maschine gesendet und dort entsprechend umgesetzt.

In die umgekehrte Richtung werden die Meßwerte der einzelnen Sensoren über die zugehörigen Dienste distributiert. Mit Hilfe dieser Meßergebnisse können die unterschiedlichen Adaptionsmechanismen der Maschine aktiv werden. Diese Mechanismen können in künstliche Reflexe und planenden Module unterteilt werden.

Reflexe werden im BROCKHAUS [Bro72] wie folgt definiert:

> „Reflex [lat.-frz.] der, *Physiologie:* bei Menschen und Tieren eine *reflektorisch* d. h. auf einen bestimmten Reiz hin regelmäßig eintretende, im allgemeinen vom Willen und von der Mitwirkung des Bewußtseins unabhängige, automatisch erscheinende Reaktion."

In Anlehnung daran reagieren die künstlichen Reflexe ebenfalls auf bestimmte Reize, die auch aus einer Kombination von Einzelereignissen bestehen können, in einer Art *ad-hoc* Reaktion. Diese Reaktion kann als „automatisch" bezeichnet werden.

Im Gegensatz dazu sollen die planenden Module Aufgaben lösen, die ein vorausschauendes Verhalten erfordern. Daher sind diese Module eng mit einer Datenspeicherung und einer Modellvorstellung des Maschinenkörpers verbunden.

Die Arbeit und Wirkung der Reflexe und der planenden Module auf die Eingangsparameter der neuronalen Netze wird in Abbildung 39 genauer dargestellt. Die Parameter selbst bilden zusammen mit den Sensorinformationen die Daten, aufgrund derer die Reflexe oder Planmodule ihr Eingreifen veranlassen. Findet kein Eingreifen statt, handelt es sich um eine ungestörte Bewegung und die unveränderten Parameter dienen als Eingangsmuster für die Beinnetzwerke.

Wenn ein Reflex aktiviert wird, kann dies entweder zu einer lokalen oder einer globalen Maßnahme führen. Eine lokale Maßnahme ist auf die Änderung der Parameter eines einzelnen Beines oder weniger Beine beschränkt. Eine lokale Reaktion ist beispielsweise das Vergrößern einer Beinhöhe während der fortgesetzten Bewegung, um ein verfrühtes Aufsetzen des Fußes auszugleichen.

Eine globale Steuerungsmaßnahme beeinflußt die gesamte Maschine und damit alle Beine. Globale Maßnahmen benötigen daher den Zugriff auf die Parameter aller Beinnetzwerke. Ein solcher Fall tritt beispielsweise ein, wenn ein Bein mit einem Hindernis kollidiert. Die gesamte Maschine hält und weicht ein kleines Stück zurück, um das kollidierte Bein neu zu positionieren und um das Hindernis zu überwinden.

Die Reaktion mit lokalen Maßnahmen ist in der Regel auf kleine Korrekturen beschränkt. Durch die Kombination vieler dieser Maßnahmen läßt sich, wie bei CRUSE [CBD+95] gezeigt, eine komplett auf lokalen Reaktionen basierende Bewegungskoordination implementieren. Hiermit kann eine dem natürlichen Vorbild ähnliche, extrem dezentralisierte Kontrolle erreicht werden. Allerdings ist diese Methode, wie bereits in der Einleitung erwähnt, nur sehr schwer erweiterbar und im Hinblick auf Sicherheitsmechanismen ungünstig.

Da die planenden Module in der Regel Modelle oder Datenspeicher verwenden, die Informationen über alle Beine enthalten, kann hier praktisch nicht mehr von lokalen Reaktionen gesprochen werden, selbst wenn von einer Reaktion lediglich ein einzelnes Bein betroffen ist. Aus diesem Grund können die planenden Module lediglich globale Reaktionen auslösen.

5.2 Künstliche Reflexe

Die künstlichen Reflexe und deren Zusammenarbeit sichern die grundlegenden Adaptionsmechanismen der Maschine in komplexer Umgebung. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Auslöser und die Reaktionen der implementierten Methoden.

5.2.1 Aufstandsreflex

Bereits bei AMENDT [Ame95] ist unter der Bezeichnung „Reliefmodul“ eine Methode vorgestellt, die es einer Gehmaschine ermöglicht, leicht unstrukturiertes Gelände, also Untergrund mit leichten Erhebungen und Senken, zu bewältigen.

Dieses Modul agiert aufgrund der Annahmen, daß bei einem korrekten Tripod Gang lediglich die in Abbildung 40(a) gezeigten Aufstandsmuster vorkommen dürfen. Als falsch werden in dieser Methode beispielsweise die in Abbildung 40(b) gezeigten Muster identifiziert. Unter Ausschluß der statisch unmöglichen Aufstandsmuster verbleiben drei korrekte und zwölf fehlerhafte Varianten, die als Trainingsmuster für ein neuronales Netzwerk dienen.

Diese ebenso einfache wie bestechende Methode hat allerdings mehrere Nachteile, die sich in der weiteren Verwendung als problematisch erwiesen haben. Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei allen hier verwendeten Gehmaschinen um Mechanismen, deren Fertigungs- und Montagegenauigkeit keinen besonders hohen Ansprüchen genügen sollen und können und zudem eine hohe Elastizität aufweisen. Aus diesem Grund werden die theoretischen Aufstandsmuster der Füße nicht immer erreicht. Wie der Abbildung 41 zu entnehmen ist, entstehen teilweise deutliche Abweichungen von diesen Mustern. Diese Abweichungen würden als zu korrigierende Fehlstellungen eingestuft, obwohl sie im Rahmen der Situation als korrekt zu betrachten sind. Unabhängig von dieser Problematik bietet die oben vorgestellte

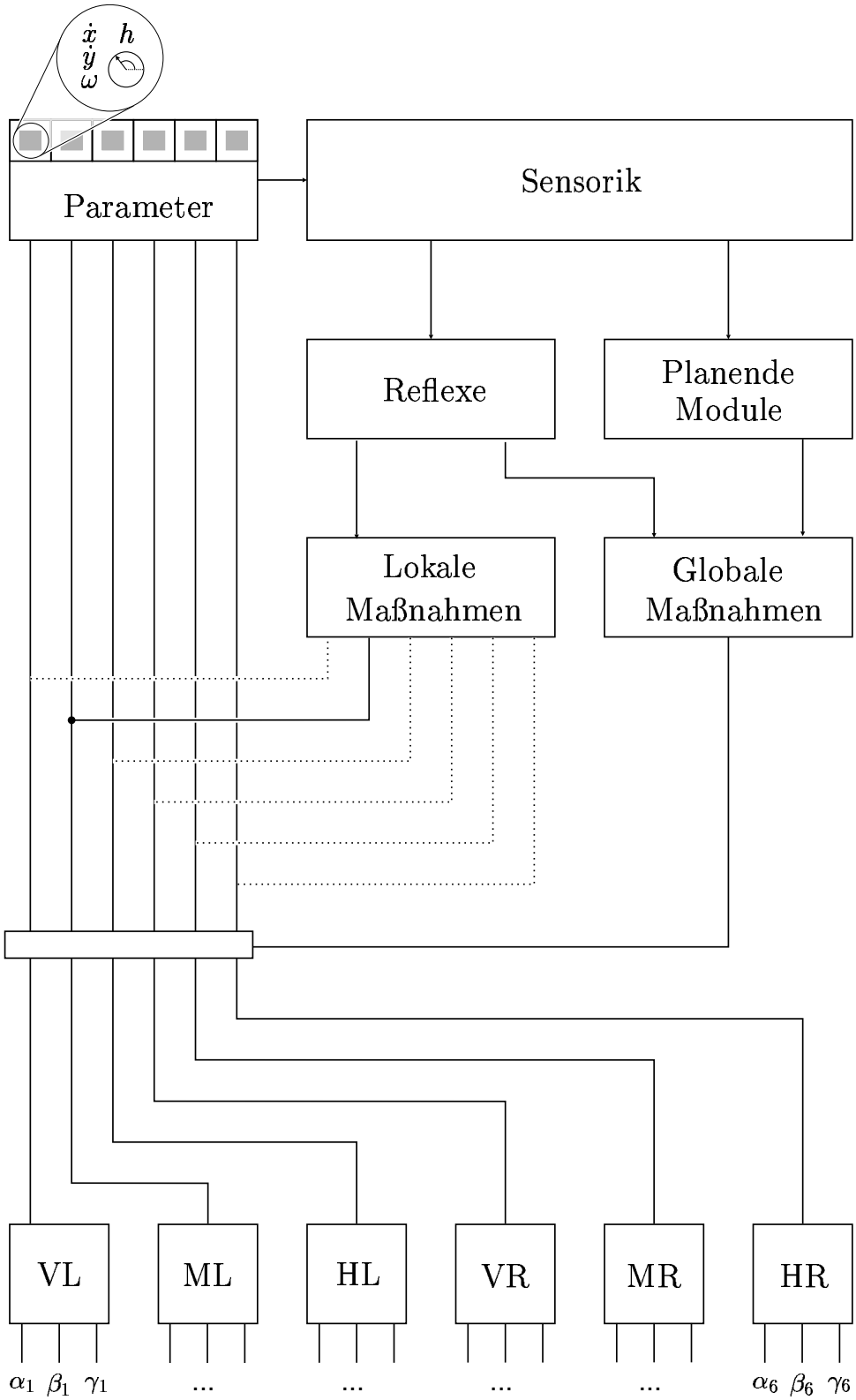


Abbildung 39: Schema der adaptiven Bewegungskoordination

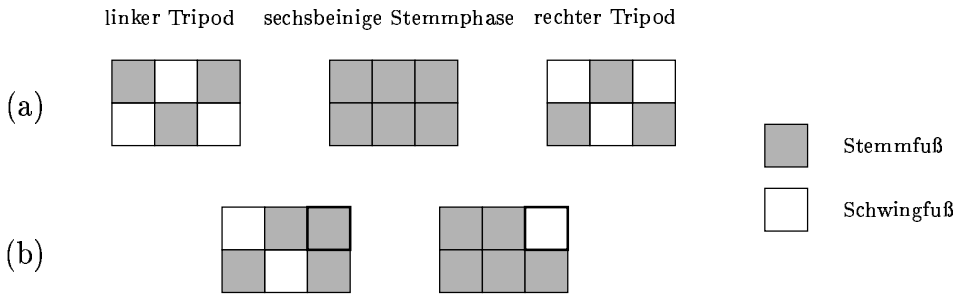


Abbildung 40: Aufstandsmuster eines korrekten Tripod Ganges (a) und bei Störungen des linken vorderen Beines (b)

Methode prinzipbedingt keine Lösung für das gleichzeitige verfrühte Auftreten von zwei Beinen oder den Lauf im Tetrapod- oder Wellengang, da hier die Unterscheidung der korrekten und falschen Aufstandsmuster nicht ohne weitere Information möglich ist.

Um alle Gangarten korrekt behandeln zu können, ist es daher notwendig, eine erweiterte Methode einzuführen. Hierbei bietet es sich an, die Gehmaschine und ihre Interaktion mit der Umwelt als „bestes Modell für sich selbst“[6] [Bro91] zu verwenden.

Dazu werden die Meßwerte der Fußsensoren während des unbeeinflußten Gangs über eine ebene Fläche aufgezeichnet. Parallel dazu werden die Signale des Schrittmachers protokolliert. Der beispielhafte Verlauf eines solchen Musters ist in Abbildung 41 dargestellt. Hier ist zu erkennen, daß die Aufsetzzeitpunkte der einzelnen Beine um einige Zeitschritte differieren können. Um diesen Zustand bei der Korrektur der Aufstandsmuster in unebenem Gelände zu berücksichtigen, wird ein neuronales Netz trainiert, das die Schrittmachersignale als Eingangs- und die aufgezeichneten Aufstandsdaten als gewünschte Ausgangsmuster verwendet. Die Anzahl der Eingangssignale ist prinzipiell erweiterbar, so daß sich auch weitere Parameter, wie beispielsweise der Kurvenradius, der Duty Faktor oder die Phasenlage der Beine unter Erhebung der zusätzlichen Meßdaten integrieren lassen.

Im Betrieb der Gehmaschine löst das Überschreiten einer Differenz des Ausgangssignals und der gemessenen Werte einen Aufstandsreflex aus. Bei einem verfrühten beziehungsweise verspäteten Aufsetzen wird die lokale Höhe des betroffenen Beines entsprechend vermindert bzw. vergrößert. Ein Beispiel für eine durch diesen Reflex beeinflußte Trajektorie findet sich in Abbildung 42. Bei kleineren Änderungen durch Erhebungen oder Vertiefungen im Boden wirkt dieser Reflex als lokaler Reflex. Die Höhe eines Beines wird angepaßt ohne die Fortbewegung des Roboters zu beeinträchtigen. In einem solchen Fall sind die Änderungen an der realen Fußpunkttrajektorie kaum abzulesen. Dies entspricht in der Abbildung dem im *Bereich*

[6] „The world is its own best model“

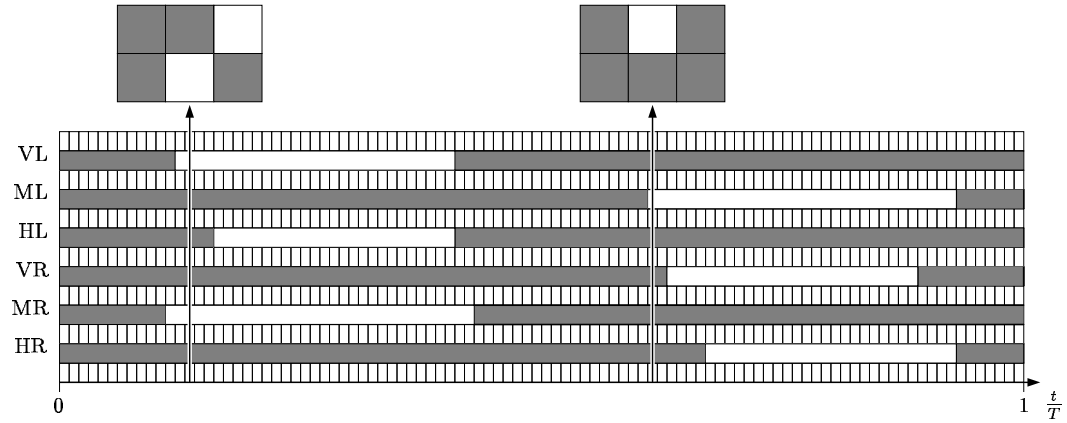


Abbildung 41: Aufgezeichnete Beinaufstandsmuster

A liegenden Teil der Trajektorie. Anders verhält es sich, wenn weitere Kriterien zutreffen. Gilt für die geänderte lokale Höhe h_i eines betroffenen Beines i:

$$h_i > \text{maximum}(h_j + \Delta h_{\max}) \qquad \text{mit} \quad j = 1, ..., 6 \quad \text{und} \quad \Delta h_{\max} \geq 0$$

deutet dies auf größere Vertiefung hin[7]. In diesem Fall wird eine globale Maßnahme ausgelöst, die die Fortbewegung stoppt und das korrekte Standmuster durch lokale Korrekturen an der Beinhöhe wiederherstellt, bevor die Bewegung fortgesetzt werden kann. In der Abbildung ist dies im *Bereich B* zu sehen. Erreicht das Bein die vorgegebene maximal mögliche Höhe, ohne einen Aufsetzpunkt gefunden zu haben, tritt eine weitere globale Maßnahme in Kraft. Die Maschine senkt durch Verringern der Höhe der restlichen Beine den Körper ab, um dem betroffenen Fuß zu ermöglichen, doch noch Bodenkontakt zu bekommen, in der Abbildung zu sehen im *Bereich C*. Mit Hilfe dieses globalen Eingriffs wird die Abhängigkeit von der aktuellen Körperhöhe bei dem Erreichen einer Stufe praktisch eliminiert. Zusätzlich wird es dadurch auch möglich, Stufen mit einem relativ großen Höhenunterschied zu überwinden.

5.2.2 Lagekorrektur

Durch die Verwendung eines Inklinometers (siehe auch Abschnitt 2.3.4) ist es möglich, die Orientierung der Maschine relativ zum Schwerefeld zu messen. Mit Hilfe der gewonnen Daten können Methoden zur Horizontierung des Roboters implementiert werden. Da auch die Lagekorrektur mit den vorhandenen Parametern der neuronalen Netze arbeitet, muß eine Methode bereitgestellt werden, die lediglich über die

[7] Der Wert $\Delta h_{\max}$ kann aufgrund der Elastizität der Maschinen normalerweise zu Null gesetzt werden.

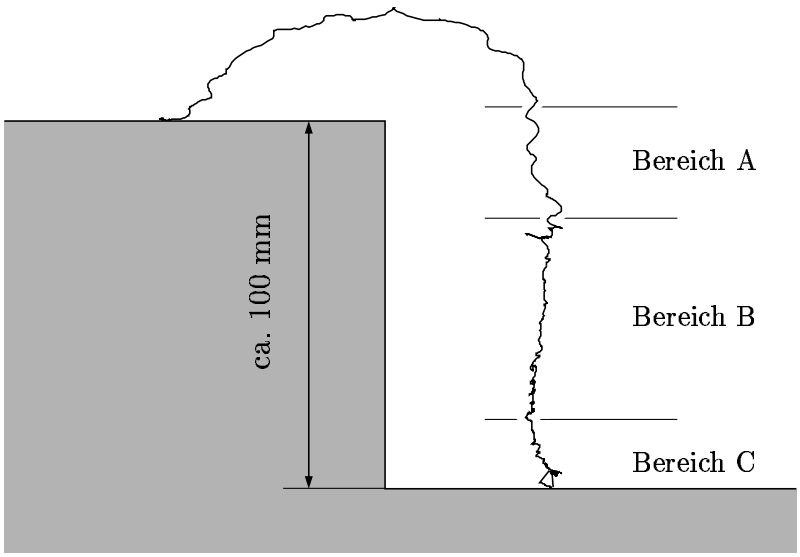


Abbildung 42: Fußpunkttrajektorie beim Absenken eines Fußes[8]

Änderung der lokalen Höhe der betroffenen Beine arbeitet. Da der entwickelte Ausgleichsmechanismus relativ einfach gehalten ist, ist es möglich, daß Aufstandsfehler entstehen. Das heißt, daß Füße durch die lokalen Höhenänderungen unbeabsichtigt Bodenkontakt bekommen oder verlieren. In diesem Fall kommt es zum Eingriff des in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Aufstandsreflexes. Die üblicherweise geringen Abweichungen können hier direkt ausgeglichen werden.

Um die notwendigen Korrektureingriffe zu verdeutlichen, soll zuerst die Maschinengeometrie bei einer Neigung um die ${}^{r}x$-Achse betrachtet werden.

Wie in Abbildung 43 zu erkennen ist, gilt der Zusammenhang

$$\tan\xi = \frac{\Delta h_i}{c_x} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta h_i = c_x \tan\xi$$

Der Parameter c_x hängt dabei von der Schrittbreite der trainierten Gangart ab und läßt sich als $c_x = \frac{w_j}{2}$ den Parametern der WALKINGLIB entnehmen (vergleiche Tabelle 6, Seite 44). Üblicherweise wird für alle gelernten Gangarten und für alle

[8]Für die abgebildete Trajektorie wurde eine Projektion von Daten verwendet, die mit Hilfe eines optischen Meßsystems erfaßt worden sind. Die dreidimensionale Positionsmessung erfolgt mit Hilfe von Markern, die an der Maschine angebracht werden. Aufgrund ihrer Größe können diese Marker nicht am Fuß selbst, sondern erst am *Tibia*-Segment befestigt werden. Somit entspricht der aufgezeichnete Weg auch nicht genau der Fußpunkttrajektorie. Die Lage der Trajektorie relativ zur angedeuteten Umgebung ist daher nur auch nur als Orientierungshilfe zu verstehen. Gleiches gilt für die Abbildung 46.

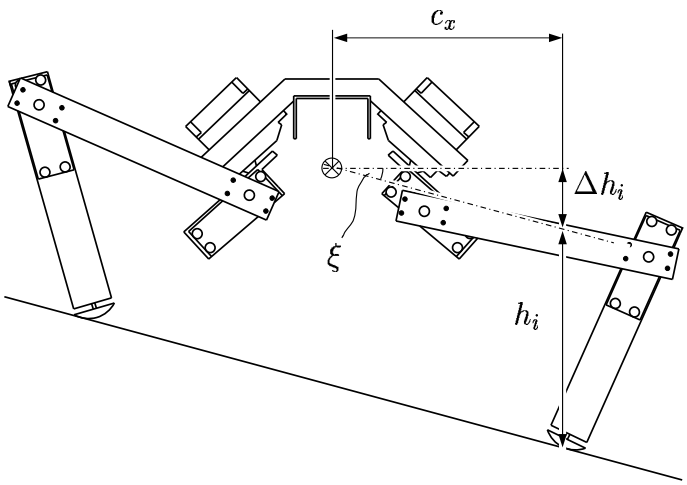


Abbildung 43: Neigung um die ${}^r x$-Achse

Beinpaare die gleiche Schrittbreite verwendet. Der Wert kann experimentell an die genauen Verhältnisse an der Maschine angepaßt werden.

Die Maschine rollt also um den Winkel ξ wenn die Beinhöhen um $\Delta h_i = c_x \tan \xi$ vergrößert (für die Beine 1, 2 und 3) bzw. verkleinert (für die Beine 4, 5 und 6) werden.

Bei einer Neigung um die y-Achse soll die Neigungsachse der ${}^r y$-Achse entsprechen, die durch die *Coxa*-Gelenke der Mittelbeine verläuft. Daher muß in diesem Fall lediglich die lokale Beinhöhe der vorderen und hinteren Beine angepaßt werden. Die geometrischen Gegebenheiten sind in Abbildung 44 dargestellt.

Für die Neigung ergibt sich damit für die hinteren Beine (Index 3 und 6)

$$\tan \eta = \frac{\Delta h_i}{b_y} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta h_i = b_y \tan \eta$$

beziehungsweise

$$\tan \eta = \frac{\Delta h_i}{a_y} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta h_i = a_y \tan \eta$$

für die vorderen Extremitäten (Index 1 und 4).

Im Gegensatz zum Parameter c_x bei der Neigung um die ${}^r x$-Achse sind a_y und b_y nicht nur von der gewählten Gangart sondern auch von der Position des jeweiligen Fußes in der Stemmphase abhängig. Versuche haben jedoch gezeigt, daß die Verwendung konstanter Werte in Verbindung mit dem Aufstandsreflex gute Ergebnisse erzielt.

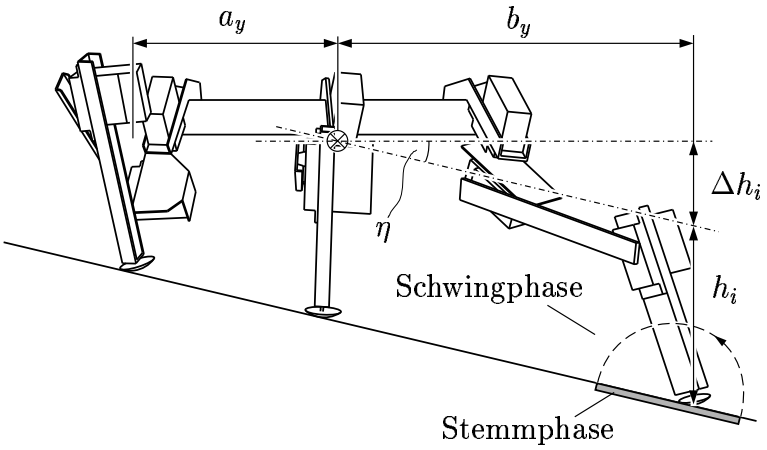


Abbildung 44: Neigung um die ${}^r y$-Achse

Die maximale Steigung, die TARRY II mit dem Zentralkörper parallel zum Untergrund bewältigen kann, liegt, je nach Reibbeiwerten des Untergrundes, im Bereich von 10° bis 14°. Am oberen Ende dieses Bereiches erreichen auch die Servomotoren eine maximale Belastung. Durch Veränderung der lokalen Beinhöhen ist die Maschine in der Lage, eine Neigung von ca. 13° um die ${}^r y$- und 17° um die ${}^r x$-Achse auszugleichen. Daß die Messung der Daten relativ zur Horizontalen, die Korrektur aber um die körpereigenen Achsen des $\mathcal{K}_r$-Systems erfolgt stellt kein Problem dar, da die Anpassung in kleinen Schritten und um den Arbeitspunkt „0“ erfolgt. Bei einer Drehung von 15° um beide Achse ergibt sich durch die Differenz der Bezugssystem ein maximaler Fehler von ca. 3,5 %.

Um die tatsächliche Korrektur der Neigung vorzunehmen, wird ein einfacher P-Regler verwendet. Um eine Abweichung zur Horizontalen auszugleichen, wird die Modifikation der Beinhöhen ermittelt, die notwendig wäre, um die gemessene Differenz auszugleichen.

Für den Ausgleich der Neigung gilt für die ${}^r x$-Achse:

$$\Delta h_i = \begin{cases} +c_x P_x \tan\xi & \text{mit} \quad i = 1,2,3 \\ -c_x P_x \tan\xi & \text{mit} \quad i = 4,5,6 \end{cases} ,$$

beziehungsweise für die ${}^r y$-Achse:

$$\Delta h_i = \begin{cases} -a_y P_y \tan\eta & \text{mit} \quad i = 1,4 \\ +b_y P_y \tan\eta & \text{mit} \quad i = 3,6 \end{cases} .$$

Wird diese Längenänderung in einem Schritt aufgebracht, gilt also $P_x = P_y = 1$, schwingt das System selbst bei kleinen Auslenkungen auf. Für Werte $P_x = P_y < 017$ wird die Neigung ausgeglichen. Eine möglichst schnelle Korrektur ohne Überschwingen wird mit einem Wert von $P_x = P_y < 0{,}04$ erreicht. Mit diesem Faktor wird eine sprunghaft aufgebrachte Neigung von 5° um die ${}^x r$-Achse in ca. 1100 ms ohne Überschwingen ausgeglichen.

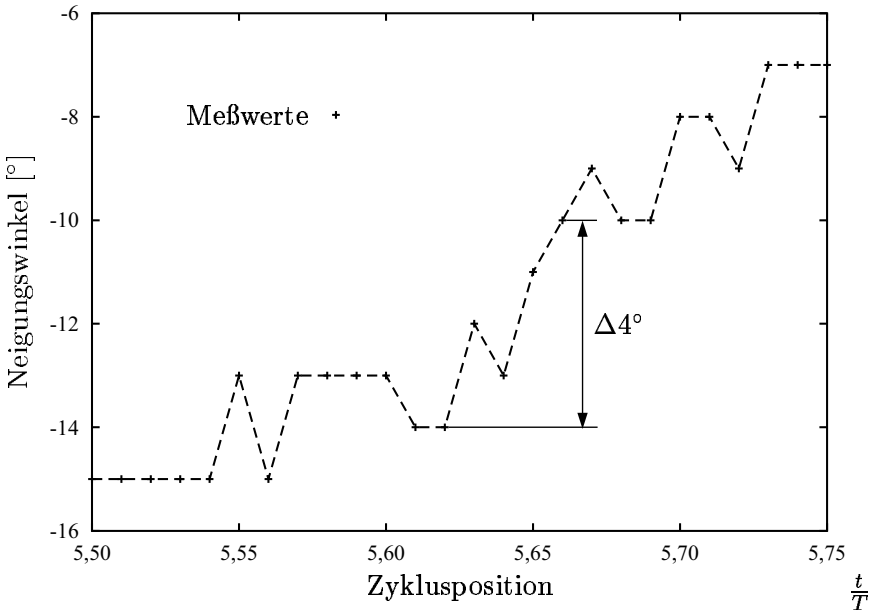


Abbildung 45: Winkelmessung beim Abrutschen vom Hindernis

Erkennung starker Veränderung und Abrutschen von Hindernissen

Die Sensorik im *Tarsus* der Maschine ist nicht in der Lage, die Qualität eines Aufstandpunktes zu beurteilen. Daher kann nicht verhindert werden, daß Kanten oder andere besonders abrutschgefährdete Stellen als Stützpunkte der Beine herangezogen werden. In solchen Positionen kommt es durch die weiteren Bewegungen leicht zum Abrutschen des entsprechenden Beines. Die zugehörige „Flugphase“ des Roboters ist allerdings zu kurz, um sie mit Hilfe der Fußpunktsensoren sicher detektieren zu können.

Als charakteristisches Merkmal eines solchen Abrutschens tritt allerdings eine deutliche Änderung der Neigung ein. In Versuchen wurde festgestellt, daß eine klare Unterscheidung zwischen Neigungsänderungen während des Laufens und während eines Sturzes getroffen werden kann, wenn die Inklinationsänderung in einem bestimmten Zeitraum einen vorgegebenen Wert überschreitet. Bei TARRY II liegt diese Schwelle bei einer Änderung von mindestens $\Delta 4°$ in höchstens 5 Messungen, die 100 ms entsprechen (vergleiche Abbildung 45).

Ein dem Abrutschen vergleichbarer Verlauf der Sensorsignale liegt vor, wenn sich die Maschine auf einer wippenden Vorrichtung bewegt. Schlägt die Wippe um, kommt es zu einer plötzlichen Änderung der Inklinationswerte, die der Änderung bei einem Abrutschen entspricht. Eine solche Wippe hat den Vorteil, daß sich die entsprechende Änderung einfacher herbeiführen läßt und die Maschine beim Testen mechanisch weniger belastet.

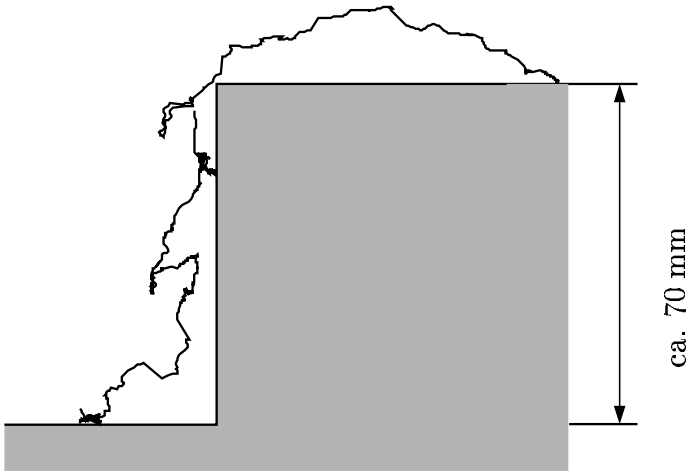


Abbildung 46: Fußpunkttrajektorie beim Übersteigen eines Hindernisses mit doppelter Kollision

Solange die Sensorik keine Neigungsänderung ermittelt, die dem beschriebenen Abrutschen entspricht, werden die globalen Änderungen an den Beinhöhen vorgenommen, ohne den Schrittmacher der Maschine zu beeinflussen. Andernfalls wird die Maschine angehalten und es findet eine Anpassung der Neigung statt. Während dieses Zeitraumes besteht auch die Möglichkeit, ein eventuell fehlerhaftes Aufstandsmuster zu korrigieren.

5.2.3 Levator-Reflex

Die Aufgabe des Levator-Reflexes ist es, der Maschine das Übersteigen von Hindernissen zu ermöglichen. Der Reflex wird durch die Kollision mit einem Hindernis ausgelöst. Um diese Kollision zu detektieren, wird die in Abschnitt 2.3.1 beschriebene Messung der Leistungsaufnahme der Servomotoren eingesetzt.

Während der Schwingphase eines Beines werden die gemessenen Leistungswerte der Servomotoren fortlaufend in einem Ringspeicher festgehalten. Dieser Speicher enthält mehrere Meßwerte, wobei ein neuer Wert den jeweils ältesten überschreibt. Enthält dieser Speicher eine Anzahl von Meßwerten, die die vorher ermittelte Reizschwelle übersteigen, wird der Reflex ausgelöst. Um diese Reizschwelle festzulegen, werden die maximalen Werte der Leistungsaufnahme in der Schwingphase bestimmt. Zu diesem Zweck wird der Roboter in einer vertikalen Position gehalten, während verschiedene Gangmuster abgespielt werden. Die dabei entstehenden Maximalwerte werden als Auslöser für den Reflex festgehalten. Durch die starke Differenz zwischen den Kollisionswerten und den Werten bei ungestörtem Lauf, sowie der Forderung nach mehreren überschreitenden Werten, können Fehlauslösungen sehr sicher vermieden werden.

Bedingt durch den Aufbau und die Struktur der Maschine findet vor der deutlichen Erhöhung der Leistungsaufnahme auch eine elastische Verformung der beteiligten Elemente statt. Daher wird dieser Reflex meist erst ausgelöst, wenn bereits enger Kontakt mit dem Hindernis vorliegt. Um die Bewegungsfreiheit des betroffenen Beines wieder herzustellen, wird zuerst die gesamte Maschine durch Umkehren der Schrittmacher um einige Teilschritte zurückbewegt. Dadurch wird der Kontakt zwischen Bein und Hindernis stark reduziert. Im Anschluß daran wird das betroffene Bein durch weitere Beeinflussung seines Schrittmachers weiter zurückgezogen. Bereits während dieser Rückbewegung wird die lokale Höhe des Beines reduziert, das Bein damit näher an den Körper bewegt. Im Anschluß an diese Rückbewegung und die damit verbundene Befreiung vom Kollisionpartner wird versucht, die Schrittmacherposition zum Zeitpunkt der Kollision wieder zu erreichen, während die lokale Beinhöhe weiter reduziert wird. Die nicht betroffenen Beine setzen wieder in die Bewegung mit ein, sobald die Position erreicht wird, an der sie nach ihrer Rückwärtsbewegung angehalten wurden. Kommt es während dieses Versuches zu einer erneuten Kollision, wird die Prozedur wiederholt. Dies geschieht so lange, bis das Hindernis überstiegen worden ist oder die minimale lokale Beinhöhe erreicht worden ist. Wenn die minimale Höhe erreicht worden ist muß das Hindernis als unübersteigbar aufgefaßt werden. In diesem Fall tritt die Maschine den Rückzug an. Während des gesamten Vorgangs wird die Schrittmachergeschwindigkeit deutlich reduziert. Das ursprüngliche Tempo wird erst wieder aufgenommen, wenn die Schrittmacherposition, die bei Beginn der Kollision vorlag, um einen gewissen Wert überschritten worden ist. Direkt aufeinanderfolgende Kollisionen, die durch eine ungünstige Hindernisform entstehen können, lassen sich so besser behandeln.

Die Fußtrajektorie, die bei einer doppelten Kollision mit einem Hindernis entsteht, ist in Abbildung 46 dargestellt. Die abgebildete Trajektorie wurde aus einer Videoaufzeichnung übertragen und gibt damit den Verlauf des Fußes im Rahmen der möglichen Genauigkeit wieder.

5.2.4 Rückführungsreflex

Als nachgeordneter Reflex ist der sogenannte Rückführungsreflex zu erwähnen. Dieser Reflex dient dazu, im ungestörten Lauf die veränderten lokale Beinhöhen wieder auf ein neutrales Niveau zurückzuführen.

Dieser Reflex tritt in Kraft, wenn keine anderen Reflexe ausgelöst worden sind. Werden Abweichungen von den neutralen Werten festgestellt, so erfolgt eine Korrektur der Beinhöhen, soweit dies möglich ist, ohne die Inklination zu beeinflussen. Durch diesen Reflex paßt sich die Körperhöhe beispielsweise nach dem Ersteigen einer Rampe, bei dem die lokalen Beinhöhen aller Beine verringert werden, wieder an die ursprünglichen Werte an.

5.3 Planende Module

Neben den Reflexmodulen, die eine Reaktion unmittelbar auf einen auslösenden Reiz hin veranlassen, bietet die Kontrollarchitektur Raum für sogenannte „planende Module“. In diesen Modulen sind Mechanismen enthalten, die von dem einfachen Reiz-Reaktionsschema abweichen, und die Möglichkeit zu planender und vorausschauender Handlung bieten. Um dies zu ermöglichen, greifen sie auf Selbst- und Weltmodelle zurück, in denen die Umgebung und die Maschine abgebildet werden. Ihre Funktionsweise und die entsprechenden Modelle werden in diesem Kapitel beschrieben.

5.3.1 Umgehung großer Hindernisse

Die für TARRY II eingesetzte Hindernisumgehungsstrategie dient dazu, der Maschine in einem von außen unbeeinflußten Lauf in unbekanntem Gelände eine möglichst langandauernde Fortbewegung zu ermöglichen. Dazu ist es notwendig, unüberwindbare Hindernisse, wie Wänden oder große Gegenstände, möglichst vor einer Kollision zu erkennen, und ihnen ohne die zwangsläufig scheiternden Überwindungsversuche auszuweichen.

Mit Hilfe der in Abschnitt 2.3.5 vorgestellten Ultraschallsensoren oder vergleichbaren Modellen ist es möglich, vor der Maschine liegende Hindernisse mit einer weiten Varianz von Materialeigenschaften zu erfassen. Aufgrund der gewonnenen Daten, der Kenntnis der Ausmaße der Gehmaschine und der aktuellen Bewegungsparameter kann eine mögliche Kollision vorhergesagt und die Bewegung angepaßt werden, um das Hindernis zu umgehen.

Der entsprechende Ultraschallsensor wird so an der Gehmaschine angebracht, daß er mit Hilfe eines Servomotors relativ zur Längsachse der Maschine gedreht werden kann. Aus den Angaben in Abschnitt 2.3.5 und entsprechenden Messungen kann bei einer Reichweite von 2 m eine maximale Meßdauer von 13 ms ermittelt werden. Bei den üblichen Geschwindigkeiten liegt die zurückgelegte Strecke während einer solchen Messung damit in der Größenordnung von 1 mm und beeinflußt daher das Meßergebnis praktisch nicht. Um den gesamten Bereich zu erfassen, wird in verschiedenen Winkelpositionen nacheinander gemessen. Nach der Messung in einem der äußeren Kegel ändert sich die Drehrichtung des Servomotors. Eine Darstellung des erfaßten Bereiches mit exemplarischen Hindernissen findet sich in Abbildung 47(a). Die sich daraus ergebenden Meßergebnisse sind in Abbildung 47(b) veranschaulicht. Dabei ist auch zu erkennen, daß für die gemessenen Ultraschallkegel die genaue Hindernislage im Sektor nicht ermittelt werden kann, da der Sensor nur die Entfernung, aber keinen Winkel erfaßt. Um eine einfache Kollisionsberechnung zu ermöglichen, wird der sich ergebende Bogen durch einzelne Punkte ersetzt. Die Anzahl der zusätzlich zu den begrenzenden Ecken notwendigen Punkte ergibt sich aus der Breite der Maschine und der Bogenlänge des Kreissektors.

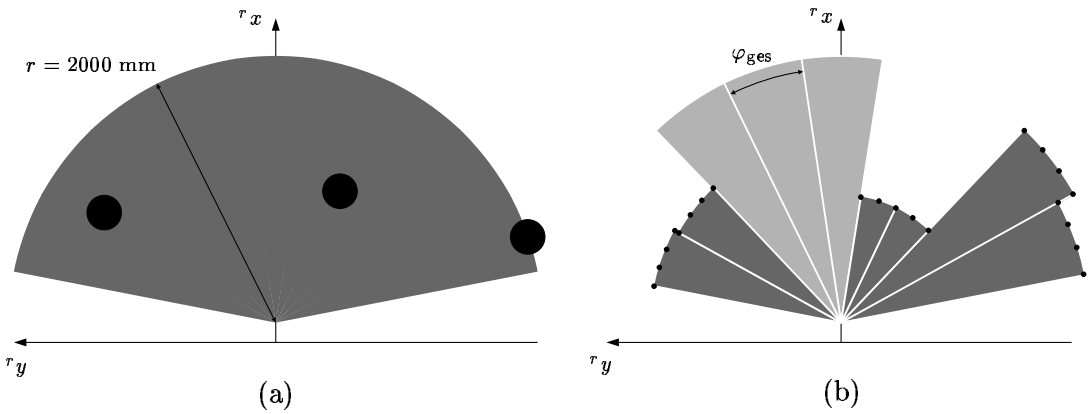


Abbildung 47: Mit dem Ultraschallsensor überstrichener Bereich mit Hindernissen (a) und die daraus ermittelten Meßdaten (b)

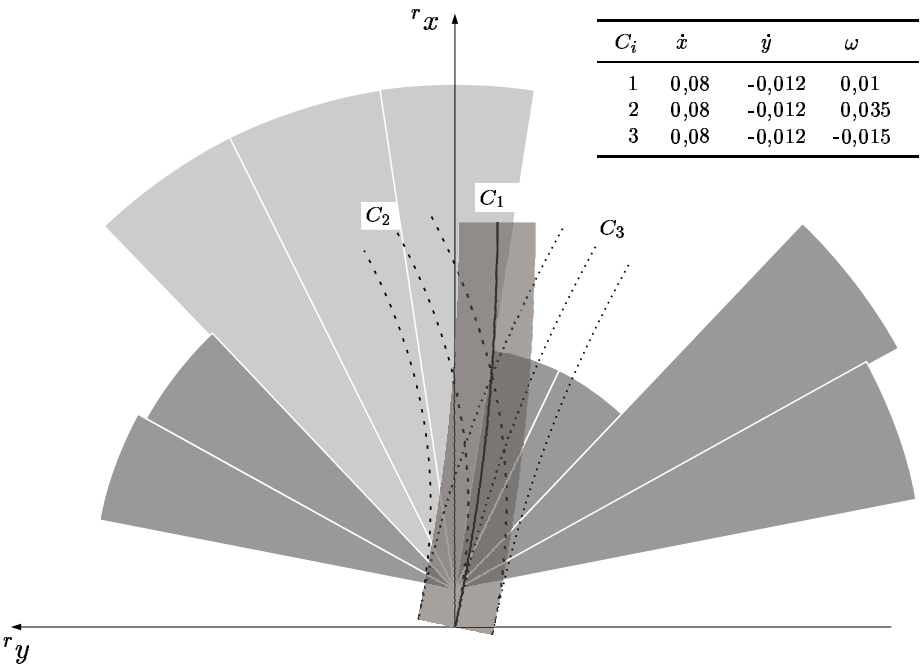
Durch die Zeitspanne, die benötigt wird, den beschriebenen Bereich vor der Maschine jeweils einmal komplett zu vermessen, entstehen einige Ungenauigkeiten. Daher sollte die Vorwärtsgeschwindigkeit der Maschine so festgelegt werden, daß der zurückgelegte Weg des Roboters während eines Sensorumlaufes nicht zu groß wird. In dem vorliegenden Fall muß wegen der großen Reichweite des Sensors und der generell verhältnismäßig niedrigen Geschwindigkeit der Maschine keine Anpassung vorgenommen werden. Als prinzipielles Handicap bleibt die durch die zeitlich aufeinanderfolgenden Messungen unterschiedlichen Referenzpositionen der gespeicherten Entfernungen. Da aber eine Zwischenspeicherung und verzögerte Nutzung oder eine rechnerische Korrektur der Daten vermieden werden soll, wird diese Ungenauigkeit in Kauf genommen. Eine mögliche Lösung dieses Problems wäre die Verwendung mehrerer Sensoren, die eine gleichzeitige Messung ermöglichen würden.

Bedingt durch das Sichtfeld des Ultraschallsensors ist die vorgestellte Strategie nur sinnvoll, wenn sich die Maschine nicht rückwärts bewegt. Die Eingangswerte $\dot{x}$, $\dot{y}$ und ω des neuronalen Netzwerkes bestimmen den Weg der Gehmaschine. Im Inertialsystem bildet dieser Weg eine Kreisbahn mit dem Mittelpunktsvektor

$$^r\mathbf{x}_m = \frac{1}{\omega} \begin{pmatrix} -\dot{y} \\ \dot{x} \\ 0 \end{pmatrix}$$

und dem Radius $R_m = |^r\mathbf{x}_m|$. Der Fall $\omega = 0$ wird für die Hindernisvermeidung mit Hilfe eines sehr kleinen ω-Wertes approximiert. Die Genauigkeit dieser Näherung liegt dabei weit über der durch die Gehmaschine selbst verursachten Abweichungen.

Die Länge des Bogens ergibt sich aus der betrachteten Bewegungsdauer. Dabei ist zu beachten, daß die Abweichungen von diesem theoretischen Weg mit fortschreitendem



C_i	$\dot{x}$	$\dot{y}$	ω
1	0,08	-0,012	0,01
2	0,08	-0,012	0,035
3	0,08	-0,012	-0,015

Abbildung 48: Hindernissituation mit dem aktuellen Maschinenweg C_1 und den beiden Alternativwegen C_2 und C_3

Gang immer größer werden. Mit Hilfe dieses Pfades kann die Anzahl der Schritte bis zu einer möglichen Kollision ermittelt werden. Wird eine bestimmte Schrittzahl bis zur Kollision nicht unterschritten, findet keine Reaktion statt.

Unterhalb dieser Grenze wird zuerst die Rotationsgeschwindigkeit ω angepaßt, um auf die Barriere zu reagieren. Sowohl bei einzelnen, räumlich eng umgrenzten Hindernissen, wie Säulen, als auch bei Wänden kann der Zusammenstoß bereits hiermit meist vermieden werden. Um die Richtung der Anpassung zu bestimmen, wird die Anzahl der Schritte bis zu einer Kollision für die um $\pm\Delta\omega$ veränderten Parameter berechnet. Die Bahn, die den längsten Lauf ohne Kollision bietet, wird eingeschlagen. Für die in Abbildung 47 dargestellten Hindernisse sind die entsprechenden Bahnen in Abbildung 48 dargestellt. Der linke Alternativpfad bietet über den betrachteten Zeitraum eine hindernisfreie Fortbewegung und würde daher gewählt. Ist eine Bewegung in die ursprünglich vorgegebene Bewegungsrichtung über die minimale Anzahl von Schritten hinaus wieder möglich, wird diese Richtung erneut eingeschlagen. Da es sich bei diesem Verfahren um eine rein lokale Optimierung handelt, ist es natürlich möglich, daß die kurzfristig richtige Entscheidung sich später als nachteilig erweist.

Durch eine ungünstige Hindernissituation ist es also möglich, daß die Maschine sich in eine Lage manövriert, in der es sehr bald zu einer Kollision kommen wird. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn durch die Rotation ein Hindernis seitlich in den

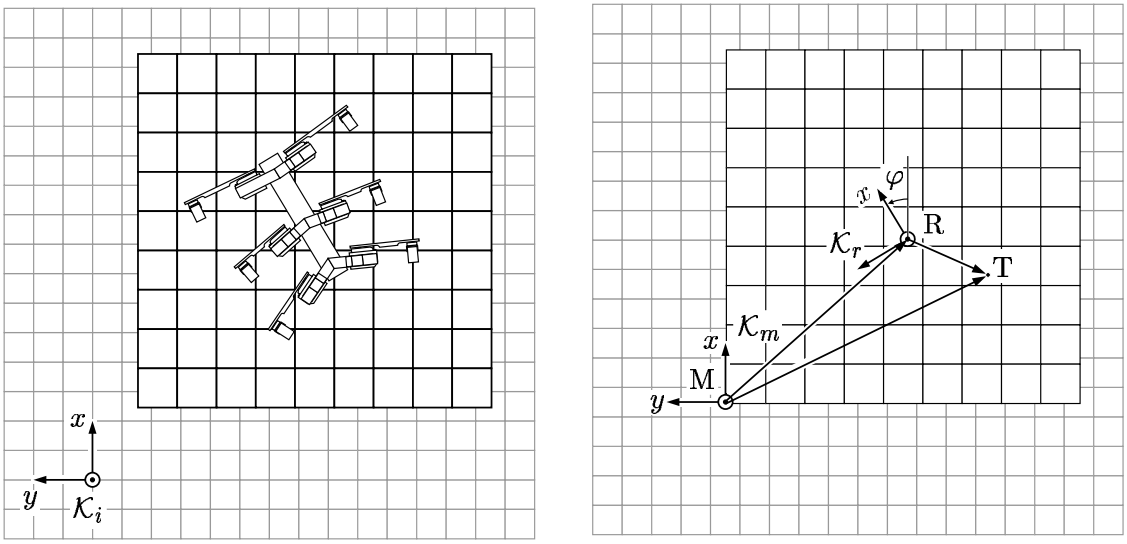
Erkennungsbereich des Ultraschallsensors gelangt. Ähnliche Fälle können auftreten, wenn Hindernisse erst spät vom Sensor erkannt werden oder in einer nicht statischen Umgebung Hindernisse „plötzlich“ vor der Maschine auftauchen. Um mit entdeckten Barrieren umzugehen, deren Entfernung einen geringen Mindestabstand unterschreitet, wird die translatorische Bewegung der Maschine eingestellt. Dies verkleinert den Radius des gelaufenen Kreisbogens auf Null und bewirkt damit eine Drehung der Maschine auf der Stelle. Eine sinnvolle Wahl zwischen den beiden möglichen Richtungen mit Hilfe der Ultraschalldaten ist bei den kurzen Distanzen nicht mehr möglich. Stattdessen wird die aktuelle Drehrichtung verwendet, wobei ω auf den Maximalwert verstärkt wird. Diese Methode versetzt die Maschine auch in die Lage, sich beispielsweise aus einem Korridor zu befreien, solange der notwendige Abstand zur Erkennung der Hindernisse mit dem Ultraschallsensor gegeben ist. Bei allen Änderungen erfolgt die Anpassung der Netzwerkparameter über einen P-Regler.

Experimente mit diesen Ausweichbewegungen sind in den Abschnitten 6.7 und 6.8 beschrieben.

5.3.2 Umgebungskarte

Die in Abschnitt 5.2.1 und 5.2.3 vorgestellten Aufstands- und Levator-Reflexe sorgen dafür, daß Kollisionen oder das verfrühte und verspätete Aufsetzen eines Fußes in geeigneter Weise behandelt werden. Hiermit ist es bereits möglich, Hindernisse zu übersteigen. Aufgrund ihrer Implementation als Reflex setzen sie jedoch entsprechende Reize als Auslöser voraus. Um ein Hindernis vollständig zu überwinden, reicht es also nicht aus, wenn nur das Vorderbein kollidiert. Auch die nachfolgenden Beine müssen anstoßen, um den Levator-Reflex auszulösen. Ähnlich verhält es sich, wenn die Maschine das erhöhte Niveau wieder verlassen soll. Um nach einem Hindernis wieder Bodenkontakt zu bekommen, müssen die Füße meist deutlich abgesenkt werden. Dazu ist es oft notwendig, die Maschine anzuhalten, bis ein neuer Aufstandspunkt für das entsprechende Bein gefunden worden ist. Auch diese Prozedur muß gezwungenermaßen für alle Beine wiederholt werden. Ein solches Vorgehen hat zwei Nachteile: Neben der stärkeren mechanischen Belastung durch die erhöhte Kollisionszahl sinkt die Fortbewegungsgeschwindigkeit deutlich.

Eine Methode dies zu verhindern ist der sogenannte *follow the leader* Gang, der auch in der Natur zu beobachten ist. Bei diesem Verfahren verwenden die ipsilateral benachbarten Beine die Aufstandspunkte der rostral gelegenen Füße als nächste Standposition. Durch die geeignete Wahl der Gangparameter ist es auch für die TARRY Gehmaschinen prinzipiell möglich, diese Punkte jeweils mit dem nächsten Schritt zu erreichen. Dies erfordert aber neben der genauen Abstimmung der Parameter eine relativ hohe Ausführungsgenauigkeit, um eine Kollision der *Tarsi* zu vermeiden.



(a) (b)

Abbildung 49: Darstellung der Gehmaschine mit Umgebungskarte (a) und mit den zugehörigen Koordinatensystemen (b)

Als Alternative, die auch eine weitergehende Verwendung ermöglicht, ist in [GF00] die Nutzung einer Geländekarte vorgeschlagen worden, die die Umgebung unterhalb der Maschine abbildet. Bei Versuchen, aus den Daten des Ultraschallsensors Karten der weiteren Umgebung zu erzeugen und entsprechend den Bewegungen der Maschine zu verschieben, hat sich gezeigt, daß eine genaue Vorhersage der Position der Gehmaschinen über mehrere Schritte hinaus mit einem relativ großen Fehler behaftet ist. Bei einer Karte, die nur das Gelände unterhalb der Maschine und einen angemessenen Bereich der Umgebung speichert, ist dies nicht problematisch. Durch die Bewegung der Maschine relativ zum Untergrund wird das ursprünglich gemerkte Areal schnell wieder verlassen. Bei einem reinen Vorwärtsgang mit einer Schrittlänge aus dem Bereich der trainierten Muster braucht die Maschine drei bis vier Schritte, um die eigene Aufstandsfläche zu durchmessen. Dadurch werden die gespeicherten Daten schnell genug wieder verworfen bzw. durch neue Werte ersetzt, und die entsprechenden Fehler bleiben klein.

Mit Hilfe der gespeicherten Informationen und den bekannten aktuellen Gangparametern der Maschine soll nun die Fähigkeit, die Bewegung an die Geländestrukturen anzupassen, erhöht werden.

Da sich die Orientierung der Gehmaschine relativ zur Umgebungskarte ändert, sollten die Felder der Karte für die x- und y-Richtung in Anzahl und Länge identisch

sein, um eine Orientierungsabhängigkeit auszuschließen. Zur Bildung der Karte wird der betrachtete Bereich also quadratisch gewählt und in ebensolche Felder aufgeteilt. Jedes dieser Kartenelemente mit der Seitenlänge k beschreibt das repräsentierte Gelände durch den vertikalen Abstand des Untergrunds zum $\mathcal{K}_r$-System und einen zusätzlichen Parameter, der angibt, ob und in welcher Weise das Feld bereits initialisiert worden ist. Eine schematische Darstellung einer Gehmaschine und der zugehörigen Umgebungskarte findet sich in Abbildung 49(a). Bei dem Feld, das die Karte repräsentiert, handelt es sich um das zum i-System in x-y-Richtung parallelverschobene und skalierte $\mathcal{K}_m$-System.

Die Informationen zur Bodenhöhe, die in der Karte gespeichert werden, werden mit Hilfe des Maschinenmodells ermittelt. Für ein Bein, dessen Fußpunktsensorik Bodenkontakt signalisiert, wird die Position des *Tarsus* in den Koordinaten des $\mathcal{K}_r$-Systems, ${}^r\mathbf{r}_{\mathrm{RT}}$, mit Hilfe der bekannten Gelenkwinkel über die in der WALKINGLIB implementierte Kinematik berechnet. Sind nun Lage und Orientierung des $\mathcal{K}_r$-Systems relativ zum $\mathcal{K}_m$-System bekannt, so kann die Position transformiert und der ermittelte Wert in die Karte eingetragen werden.

Geht man vorerst davon aus, daß sich der Zentralkörper der Maschine parallel zum Untergrund bewegt, dann ist die ${}^rz$-Achse parallel zur ${}^mz$-Achse des Kartensystems. Damit ist zur Transformation aus dem körperfesten System die Position des $\mathcal{K}_r$-Systems und dessen Drehung φ um die z-Achse notwendig. Die Darstellung der entsprechenden Transformation findet sich in Abbildung 49(b). Die Kenntnis dieser Werte vorausgesetzt, ergibt sich für die Position des Fußpunktes in den Koordinaten der Karte:

$$ {}^m\mathbf{r}_{\mathrm{MT}} = {}^m\mathbf{r}_{\mathrm{MR}} + {}^m\mathbf{T}_r\,{}^r\mathbf{r}_{\mathrm{RT}} $$

mit

$$ {}^r\boldsymbol{T}_m = \begin{pmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k\cos(\varphi) & -k\sin(\varphi) & 0 \\ k\sin(\varphi) & k\cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} $$

Position und Orientierung der Gehmaschine werden auf eine Lage in der Mitte der Karte und eine Drehung um 0° relativ zur ${}^mx$-Achse initialisiert. Bei jeder Bewegung der Maschine werden diese beiden Werte entsprechend angepaßt. Dazu werden die Eingangsparameter der neuronalen Netze und die Änderung des Schrittmachers verwendet. Die Werte für diese Anpassung können, ausgehend von den zugrundeliegenden Daten der WALKINGLIB, durch experimentell bestimmte Faktoren an die realen Geschwindigkeiten der Maschine angepaßt werden. Da die Daten in der Karte verhältnismäßig flüchtig sind, ist das Aufsummieren der Fehler dieser Abschätzung nicht problematisch.

Ausgehend von der Startposition liegt der Ursprung des $\mathcal{K}_r$-Systems über dem mittleren Kartenfeld. Werden die Kanten dieses Feldes durch die Bewegung der Maschine

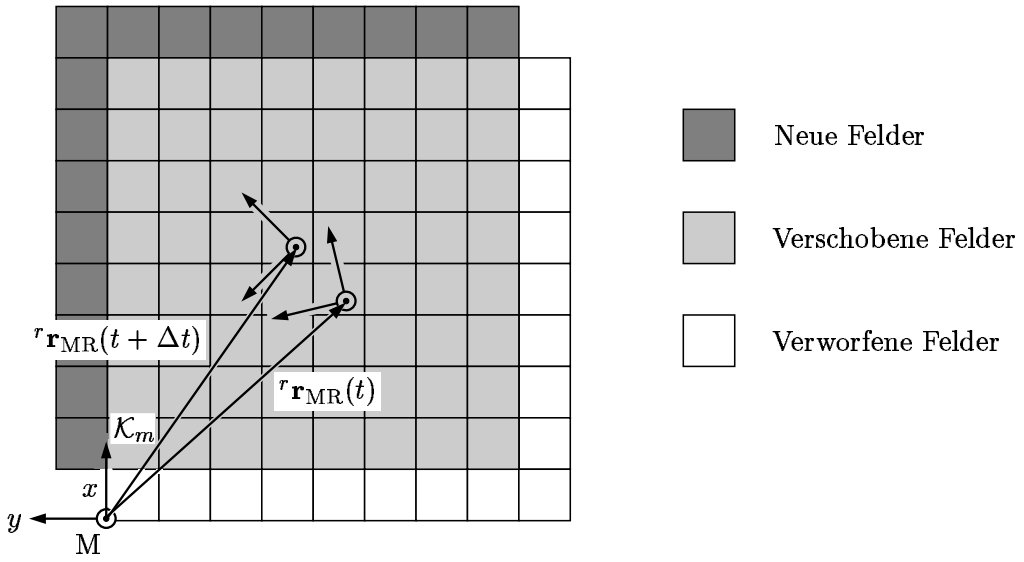


Abbildung 50: Ursprüngliche und verschobene Umgebungskarte

überschritten, so erfolgt eine Anpassung. Dazu werden die Grenzen der Karte so verschoben, daß das Kartenfeld unterhalb des Referenzursprungs die neue Kartenmitte bildet. In Richtung der Verschiebung werden am Kartenrand neue Felder mit einem unbekannten Zustand eingefügt. Die Daten von Feldern am entgegengesetzten Rand der Karte werden verworfen. Während dieser Verschiebung wird der Positionsvektor des Referenzsystems, ${}^{r}\mathbf{r}_{\mathrm{MR}}$, entsprechend angepaßt (siehe Abbildung 50).

Hat nun ein Bein eine feste Standposition, kann, wie in Abbildung 51 dargestellt, mit Hilfe einer konstant festgelegten Referenzhöhe h_{ref} über die aktuelle Beinposition ${}^{r}\mathbf{r}_{\mathrm{RT}}$ die relative Höhe h_{map} des Aufstandpunktes ermittelt und in die Karte eingetragen werden. Dabei wird davon ausgegangen, daß nicht nur der Aufstandspunkt selbst, sondern auch dessen Umfeld auf diesem Niveau liegt. Daher wird ein ganzer Bereich in der Karte entsprechend markiert. Alle Felder, deren Mittelpunkt in einem vorgegebenen Radius um den gefundenen Aufstandspunkt liegen, werden auf die ermittelte Höhe gesetzt. Das Feld, über dem sich der *Tarsus* direkt befindet, wird als „sicher“ gespeichert, während der zusätzliche Bereich als „geschätzt“ vermerkt wird. Damit sind bereits erste Vorkehrungen getroffen, um eine erweiterte Methode zu implementieren, die versucht, Geländeformen wie Stufen etc. abzuschätzen.

Vorausschauende Ausweichbewegung

Mit den Daten dieser Karte ist es nun möglich, das Verringern beziehungsweise Vergrößern der Beinhöhen zu veranlassen, bevor es zu einer Kollision kommt. Dazu werden während der Bewegung für alle Beine die unter dem Fußpunkt liegenden

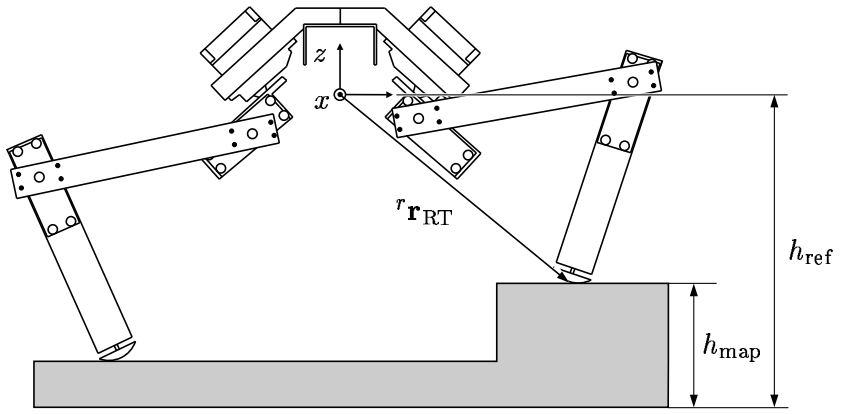
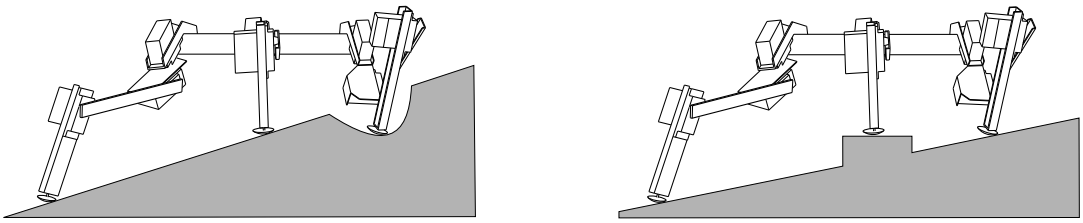


Abbildung 51: Abschätzung der Höhe eines Kartenfeldes

Kartenfelder ermittelt. Ist in dem jeweiligen Feld bereits ein Wert vermerkt worden, wird diese Höhe mit der relativen Höhe des Beines verglichen. Abweichungen zwischen diesen Werten werden durch eine Änderung der lokalen Beinhöhen schrittweise ausgeglichen. Durch die schrittweise Anpassung werden heftige Sprünge vermieden. Das Verfahren verläßt sich damit darauf, daß ein hinreichend großer Bereich in der Karte markiert worden ist, und der Anpassungsvorgang bereits vor dem eigentlichen Hindernis abgeschlossen oder zumindest eingeleitet worden ist. Aufgrund der Objektform kann es allerdings vorkommen, daß das reale Hindernis bereits vor dem markierten Bereich beginnt. In einem solchen Fall kommt es trotz der Karte zur Kollision. Dabei ist zu berücksichtigen, daß weder ein fälschlich ausgelöster noch ein versäumter Anpassungsvorgang ein Problem darstellt, da die vorgestellten Reflexe zur Behandlung einer solchen Situation weiter aktiv sind.

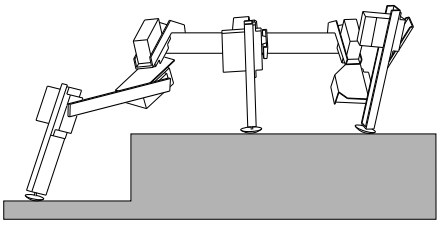
Neigungsdifferenzen zwischen dem Zentralkörper und dem Untergrund

Weicht man nun von der Forderung ab, daß der Zentralkörper parallel zum Boden sein soll, was beispielsweise der Fall sein kann, wenn der in Abschnitt 5.2.2 beschriebene Reflex aktiv ist, so sind zusätzliche Annahmen notwendig. Während der Roboter in der Lage ist, die Orientierung des Zentralkörpers relativ zur Horizontalen zu messen, muß eine mögliche Neigung des Untergrundes geschätzt werden. Je nach Aufstandssituation haben drei bis sechs Beine Bodenkontakt. Handelt es sich um genau drei Aufstandspunkte, so definieren diese eine eindeutige Fläche. Aber selbst hier ist keineswegs sicher, daß der Untergrund eine Ebene mit der aus diesen Punkten berechneten Steigung ist. Bereits die häufige Situation, daß während eines Tripods das vordere Bein auf ein Hindernis auftritt und das hintere Bein dem nachfolgt, wie in Abbildung 52(a) gezeigt, stellt diese Abschätzung vor ein nicht eindeutig zu lösendes Problem. Die Abbildungen 52(b) und (c) stellen weitere mögliche

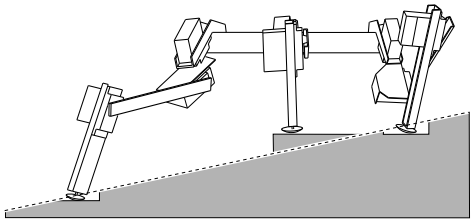


a)

b)



c)



d)

Abbildung 52: Mögliche Deutungen der Umgebung aufgrund der lokalen Beinhöhen in (a), (b) und (c) sowie Ergebnis aufgrund der Regression (d)

Interpretationen dieses Untergrundes aufgrund der Beinhöhen dar. Um den Fehler zu minimieren, wird durch lineare Regression die Ebene mit dem geringsten quadratischen Fehler für alle Beine mit Bodenkontakt abgeschätzt. Die angenommene Ebene, die sich für das gezeigte Beispiel ergibt, ist in Abbildung 52(d) gezeigt.

Die Parameter der geschätzten Ebene dienen nun dazu, sowohl beim Vermerken von Werten in der Karte, als auch beim Vergleich mit aktuellen Beinhöhen, die entsprechend ermittelten Korrekturen abhängig von der Differenz zwischen den Neigungen des Zentralkörpers und der Aufstandsebene zu berücksichtigen. Wie die experimentelle Überprüfung gezeigt hat, ist es damit möglich, das Verfahren beispielsweise auch auf einer schiefen Ebene mit aufgestellten Hindernissen einsetzen zu können.

6 Experimentelle Überprüfung

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Vorgehensweisen sollen dazu dienen, realen Maschinen die autonome Fortbewegung in unbekanntem Gelände zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurden entsprechende Mechanismen und Methoden vorgestellt, um eine solche Fortbewegung zu realisieren.

Im Verlaufe der Entwicklung ist die Funktionstüchtigkeit sowohl der Maschinen als auch der Methoden dauernd überprüft und verbessert worden. Die Versuche stellen dabei das einzig probate Mittel dar, eine Beurteilung der Methoden vorzunehmen. Eine Simulation ist mit den zur Verfügung stehenden Mitteln praktisch nicht möglich, insbesondere aufgrund der hohen Elastizität und der weiteren im System vorkommenden Ungenauigkeiten, beispielsweise aufgrund ungenauer Positionierung der Servomotoren, schwierigen Reibverhältnissen zwischen Füßen und Boden etc.

Um einen Eindruck über den Verlauf der Experimente zu vermitteln, sind einzelne Versuche mit einer Videokamera aufgezeichnet worden. Aus diesen Aufzeichnungen wurden jeweils achtzehn Einzelbilder von charakteristischen Momenten des Bewegungsablaufes ausgewählt und zu einer Abbildung zusammengestellt. Die einzelnen Bilder der Abbildung sind mit den Buchstaben a bis r fortlaufend gekennzeichnet. Die Zeit zwischen den jeweils ausgewählten Situationen ist sowohl zwischen den Experimenten als auch innerhalb einer Sequenz unterschiedlich. In den weiteren Beschreibungen werden diese Bilder beispielsweise mit „in e kann man erkennen...“ referenziert. Soweit nichts anderes erwähnt ist, bezieht sich dies auf die zu der jeweiligen Beschreibung gehörende Abbildung, die jeweils zu Beginn benannt wird.

6.1 Fortbewegung in der Ebene

Die einfachste Art der Fortbewegung ist der ungestörte Gang in der Ebene. In Abbildung 53 ist eine solche Bewegung dargestellt. In dem Teilbild a ist die Maschine noch in Ruhestellung am Boden. Aus dieser Position erfolgt bis zu f das Aufstehen. Danach beginnt der Gang mit einem unterstützenden rechten Tripod, der in Bild l beendet wird. Dabei ist gut zu erkennen, daß auch bei dem Gang in der Ebene in k das hintere linke Bein bereits wieder Bodenkontakt hat, während sich das vordere linke Bein noch in der Schwingphase befindet. Nach der kurzen sechsbeinigen Standphase in Bild l wird die Bewegung mit einem linken Tripod fortgesetzt.

6.2 Fortbewegung in leicht unstrukturiertem Gelände

Die Fortbewegung in einer leicht unstrukturierten Umgebung erfordert den Einsatz von Reflexen. Das Gelände, in dem sich die Gehmaschine bewegt, ist so gestaltet,

daß in dem gezeigten Experiment keine Kollisionen vorkommen. Bei der in Abbildung 54 dargestellen Bewegung kommt lediglich der in Abschnitt 5.2.1 beschriebene Aufstandsreflex zum Einsatz.

Die Maschine bewegt sich hier auf eine Vertiefung zu. In c ist das vordere linke Bein entsprechend abgesenkt worden. In e hat auch das vordere rechte Bein in dieser Vertiefung Kontakt. Danach ist in f zu erkennen, wie dieses Bein die nachfolgende Erhöhung knapp ersteigt. Aufgrund der günstigen Standposition, ist in dem folgenden Absenkvorgang des mittleren Beines in g und h das langsame Senken dieses Beines zu beobachten. Die Ersteigung der Stufe erfolgt durch den nun anders stehenden Zentralkörper problemlos in Bild j. In k und l bewältigt das erste Bein bereits die zweite Stufe, während das letzte Bein erst in m das Startniveau verläßt. Die Bewegungen wiederholen sich in ähnlicher Form, bis in r alle Beine Kontakt mit den beiden Stufen haben.

6.3 Fortbewegung im Gelände mit Hindernissen

Ein Gelände mit Hindernissen erfordert von der Maschine neben den im vorigen Abschnitt angewendeten Aufstandsreflexen den Einsatz des Levator Reflexes, um Hindernisse zu übersteigen. Die sich daraus ergebende Bewegung wird in diesem Abschnitt beschrieben und in Abbildung 55 dargestellt.

In Abschnitt 5.3.2 ist außerdem eine Methode beschrieben, die Höhe der Umgebung unterhalb der Gehmaschine zu speichern, um damit unnötige Kollisionen und ein langsames Absenken der nachfolgenden Beine nach Möglichkeit zu verhindern. Um die Unterschiede durch deren Einsatz zu verdeutlichen, wird ein Hindernis aufgebaut, daß die Bahn der Beine der rechten Maschinenseite behindert. Die Bewältigung dieser Hindernissituation erfolgt in diesem Abschnitt nur durch Verwendung von Reflexen. Im folgenden Abschnitt wird zusätzlich die lokale Karte eingesetzt, mit der Informationen über die Umgebung gespeichert und abgerufen werden können.

In den a und b bewegt sich die Maschine auf das Hindernis zu. In c erfolgt der erste Kontakt mit dem Hindernis. Das Hindernis selbst ist durch die Lage auf dem leicht elastischen Untergrund etwas beweglich und verschiebt sich unter dem Kontakt des Beines leicht vor und zurück. Die Maschine hält an und bewegt sich zurück, um in d nur noch sehr leichten Kontakt zum Hindernis zu haben. Die lokale Beinhöhe wird verringert und es erfolgt in e die zweite Kollision. Nach erneutem Anheben des Beines kommt es beim Ersteigen der Barriere in f nochmals zu einer kurzen Berührung, die durch den kurzen Kontakt aber nicht als Kollision registriert wird. In g beginnt die Überschreitung, die in i mit dem Aufsetzen des Fußes abgeschlossen wird. Die Maschine bewegt sich nun weiter, um den kompletten nächsten Schritt in l zu beenden. In dem folgenden Zyklus kommt es in m zur Kollision des mittleren Beines. Die Berührung erfolgt durch die geänderte Lage der Maschine auf einer

höheren Position, so daß nach der Rückbewegung in n bereits mit einem Versuch in o die Ersteigung erfolgreich abgeschlossen ist. In q beginnt bereits die Absenkung des ersten Beines, deren langsam suchende Bewegung in r erfolgreich beendet ist. Im weiteren Verlauf kommt es nun zur Kollision und Ersteigung mit dem hinteren Bein sowie einem zweifachen langsamen Absenken des mittleren und hinteren Beines. Die Absenkung der Beine am Ende des Hindernisses erfolgt für alle Beine analog zu dem im Experiment 6.2 beschriebenen Verlauf.

6.4 Hindernisbewältigung mit interner Karte

Das im vorigen Abschnitt beschriebene Experiment wird nun unter Verwendung der internen Umgebungskarte durchgeführt und in Abbildung 56 dargestellt. Die Hindernissituation ist identisch.

In a bis c erfolgt erneut die Annäherung an das Hindernis, während es in d zur Kollision kommt. Hier ist die Berührung früher erkannt worden, so daß die in Abbildung 46 dargestellte Trajektorie einer vergleichbaren Situation hier leichter wiederzuerkennen ist. Bereits während der Rückwärtsbewegung wird das kollidierende Bein in f bis g in eine höhere Bahn gehoben. Es erfolgt eine erneute Kollision in h, nach der das Bein in j bis k weiter an den Körper gezogen wird. In dieser neuen, weiter erhöhten Bahn ist es dem Bein nun möglich, daß Hindernis in l zu überschreiten und in m den Fuß aufzusetzen. In der vorausgehenden Teilabbildung l wird erstmals die interne Karte, die auch schon vorher mitgeführt und aktualisiert wurde, mit angezeigt. Dabei ist zuerst eine gleichförmige Fläche zu sehen, die den bisher erkannten glatten Boden repräsentiert. Die Position des r-Systems der Maschine ist durch einen dunkelroten Pfeil kenntlich gemacht. In m ist das erkannte Hindernis nach dem Aufsetzen des Fußes als erhöhte Fläche markiert worden, was sich durch den roten Bereich [9] darstellt. In n hat sich die Maschine ebenso wie das Hindernis in der Karte weiterbewegt. Nach dem ausgeführten Schritt wurden in n durch die Ungenauigkeiten, die durch das Aufsetzen des ersten Beines entstanden sind, die vermeintlich etwas niedrigeren Flächen unter den mittleren und hinteren rechten Füßen in die Karte eingetragen. Sie werden durch die blauen Tönungen markiert. In p ist der nächste Aufsetzpunkt auf dem Hindernis in der Karte verzeichnet worden. Durch die Weiterbewegung der Maschine liegt nun die zuerst erkannte Erhöhung auf der Höhe des r-Systems und damit im Bereich des mittleren Beines. Dadurch kann dieses Bein das vor ihm liegende Hindernis ohne Kollision erkennen und über ein in q beginnendes Anheben in r das Hindernis ohne vorherigen Zusammenstoß bewältigen. Das nicht mehr gezeigte Absenken erfolgt in ähnlicher Weise. Während das erste Bein sich seinen Aufsetzpunkt tastend suchen muß, können die nachfolgenden Beine diese Information nutzen und das Hindernis damit insgesamt deutlich schneller überwinden.

[9] Die gelbe Umrandung entsteht durch die Flanken dieses Bereiches in der grafischen Ausgabe.

6.5 Überschreiten einer Wippe

Wie bereits in Abschnitt 5.2.2 erläutert, handelt es sich bei dem Überschreiten einer Wippe und dem Abrutschen von einem Hindernis um sehr ähnliche Vorgänge. Allerdings ist das Überschreiten der Wippe experimentell deutlich leichter auszuführen. Das Experiment wird in Abbildung 57 dargestellt.

In den Teilbildern a bis d bewegt sich die Gehmaschine auf die Kippachse der Wippe zu, bringt sie aber noch nicht zum Umschlagen. Dabei ist deutlich zu erkennen, wie der Körper sich an der Horizontalen ausrichtet. In Abbildung e beginnt das Umschlagen der Wippe, das bis zum Teilbild h andauert. Noch während des Kippens wird in f der vordere linke Fuß aufgesetzt. In i ist zu sehen, wie die Maschine sich wieder aufzurichten beginnt, um die Lage wieder an die Horizontale anzupassen. Dabei kommt es zu einem leichten Überschwingen, das sein Maximum in m findet. Bis zu o wird dieses Überschwingen wieder ausgeglichen und in p beginnt die Maschine den angehaltenen Gang mit dem vorderen rechten Fuß wieder fortzusetzen.

6.6 Verhalten an einer Kante

Die Bewegung der Gehmaschine an den Rand einer Ebene ohne dahinterliegende mögliche Aufstandspunkte, verdeutlicht die Abfolge verschiedener Mechanismen, mit denen auf ein Hindernis reagiert wird. Eine entsprechende Situation wird in Abbildung 58 gezeigt.

Die Maschine nähert sich in a der Kante in ungestörtem Gang. In der Teilabbildung b findet das vordere linke Bein keinen Aufstandspunkt. Der lokale Reflex erhöht daraufhin die Beinhöhe, der Schrittmacher läuft aber noch weiter. Kurz darauf befindet sich der Fuß des lokal beeinflußten Beins deutlich unterhalb des Niveaus der anderen Füße. Daher ist als globale Maßnahme der Schrittmacher in c angehalten worden. Die Absenkung des Fußes geht weiter.

In Teilabbildung d hat das Bein die maximale Streckung erreicht, aber immer noch keinen Aufstandspunkt gefunden. Daher wird nun in e versucht, durch Absenkung des gesamten Körpers mittels einer Verminderung der lokalen Höhe der nicht betroffenen Beine, einen Aufstandspunkt für den freien Fuß zu finden.

In Teilabbildung f ist auch dies fehlgeschlagen. Daher wird ein Rückzug vorbereitet. Hier wird zuerst versucht, die Änderungen wieder zurückzunehmen f-h. Danach wird durch einfache Umschaltung der Drehrichtung des Schrittmachers der Rückzug gestartet. Zwischen i und j findet ein kurzes Abrutschen des rechten Vorderbeines statt, das in den Abbildungen nicht beobachtet werden kann. Die hat jedoch keine weiteren Auswirkungen.

Das Abgleiten des linken Beines in l ist nicht stark genug, um den in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Ausgleich auszulösen. Aber durch das Weiterbewegen der Maschine

wird die Kollision in o ausgelöst. Daraufhin setzt ein Levator-Reflex ein, der für die entgegengesetzte Bewegungsrichtung beispielsweise auch im Abschnitt 6.3 gezeigt ist. Nach der Bewältigung dieses Hindernisses kann in r der Rückzug fortgesetzt werden.

6.7 Ausweichbewegung vor einer Wand

In den beiden folgenden Experimenten werden Ausweichbewegungen gezeigt, die aufgrund der vom Ultraschallsensor erkannten Daten veranlaßt werden. Dabei werden zwei prinzipielle Hindernissituationen in Form einer „Wand“ und als „Korridor“ erzeugt. In Abbildung 59 ist durch die gut zu erkennenden gelben Kegel die Hindernissituation „Wand“ realisiert.

Bei Laufbewegungen in Richtung einer solchen Wand wird TARRY II in a mit einem Geradeauslauf gestartet und bewegt sich in c weiter in dieser Richtung auf das Hindernis zu. In d ist die Wand erkannt worden. Aufgrund der geschlossenen rechten Seite ergibt sich ein längerer ungestörter Weg durch das Laufen eines Bogens mittels einer überlagerten Drehung nach links. Bereits in e kann erkannt werden, daß der Zentralkörper langsam rotiert. Diese Drehung setzt sich so lange fort, bis ungefähr in i erkannt wird, daß der Weg in die ursprüngliche Richtung wieder eine ungestörte Bewegung über die Mindestgrenze von Schritten hinaus erlaubt. Daher werden die alten Parameter wieder hergestellt und die Maschine ist in der Lage, bis r das Hindernis im Geradeauslauf sicher zu passieren.

6.8 Ausweichbewegung in einem Korridor

Im letzten Experiment wurde die Maschine in einem durch die gelben Kegel gebildeten Korridor plaziert, der in Abbildung 60 dargestellt ist. Die Bewältigung dieses Hindernisses durch Überlagern der normalen Vorwärtsbewegung mit einer Rotation ist nicht mehr möglich.

Nach dem Start in a bewegt sich die Maschine zuerst weiter auf das Hindernis zu, während der Ultraschallsensor die Umgebung abtastet. Bevor der durch das vorausliegende Hindernis eingeleitete Lauf eines Bogens deutlich sichtbar wird, ist der notwendige Mindestabstand zum Stop der Translationsbewegung in d erreicht. Der aktuelle Eingangswert ω des neuronalen Netzes zur Steuerung der Drehung wird auf den Maximalwert erhöht, während die Translationsbewegung eingestellt wird. Dies führt zu einer Drehung auf der Stelle in e bis l. An dieser Position wird erkannt, daß eine ungestörte Bewegung mit den ursprünglichen Parametern wieder möglicht ist, so daß in m und n erneut eine Vorwärtsbewegung erfolgt. Durch ein außerhalb des gezeigten Bereiches liegendes Hindernis wird in o eine Rechdtskurve eingeleitet, unter deren Einfluß die Maschine schließlich den Korridor verläßt.

Abbildung 53: Fortbewegung in der Ebene

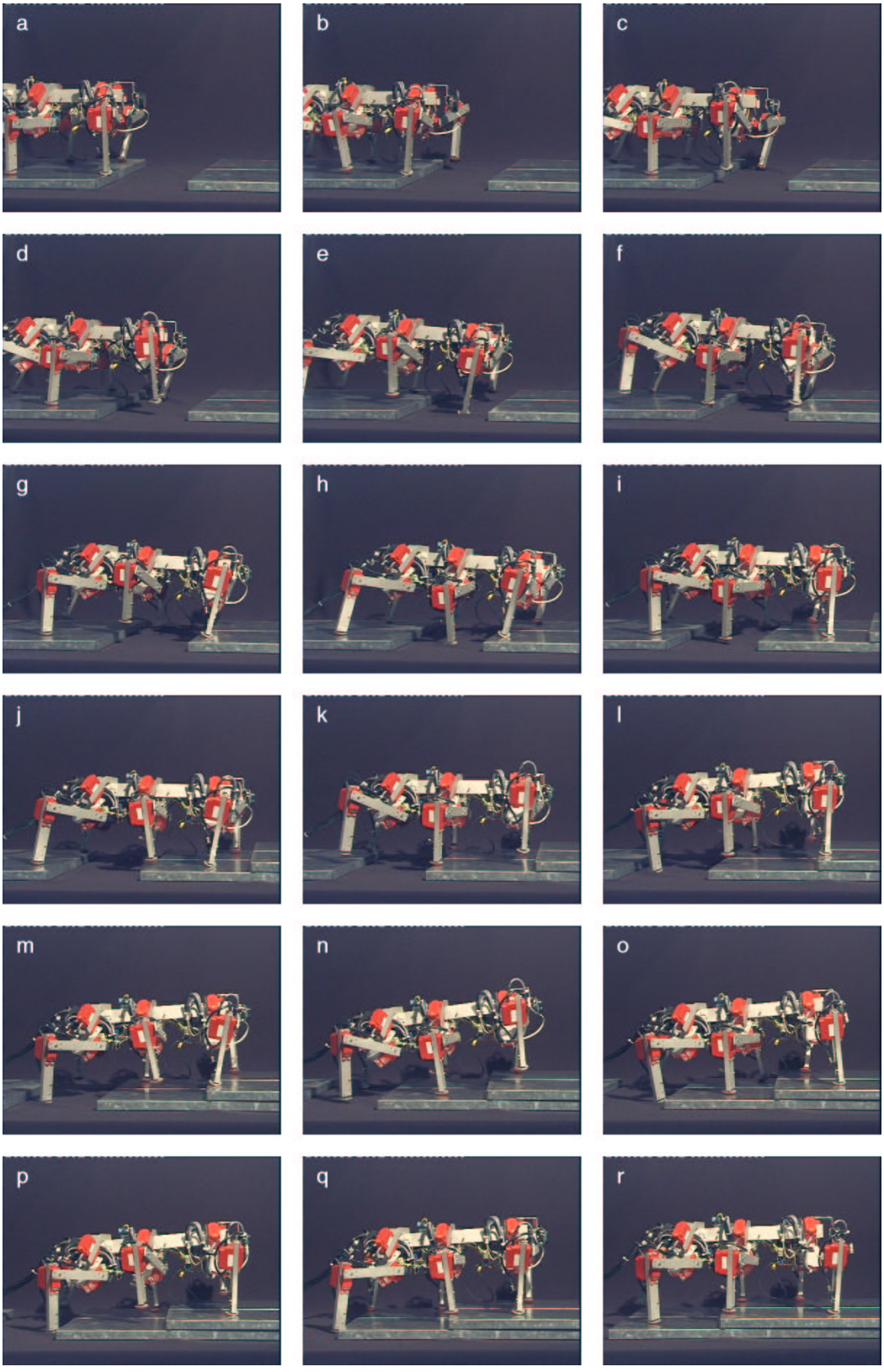


Abbildung 54: Leicht unstrukturiertes Gelände

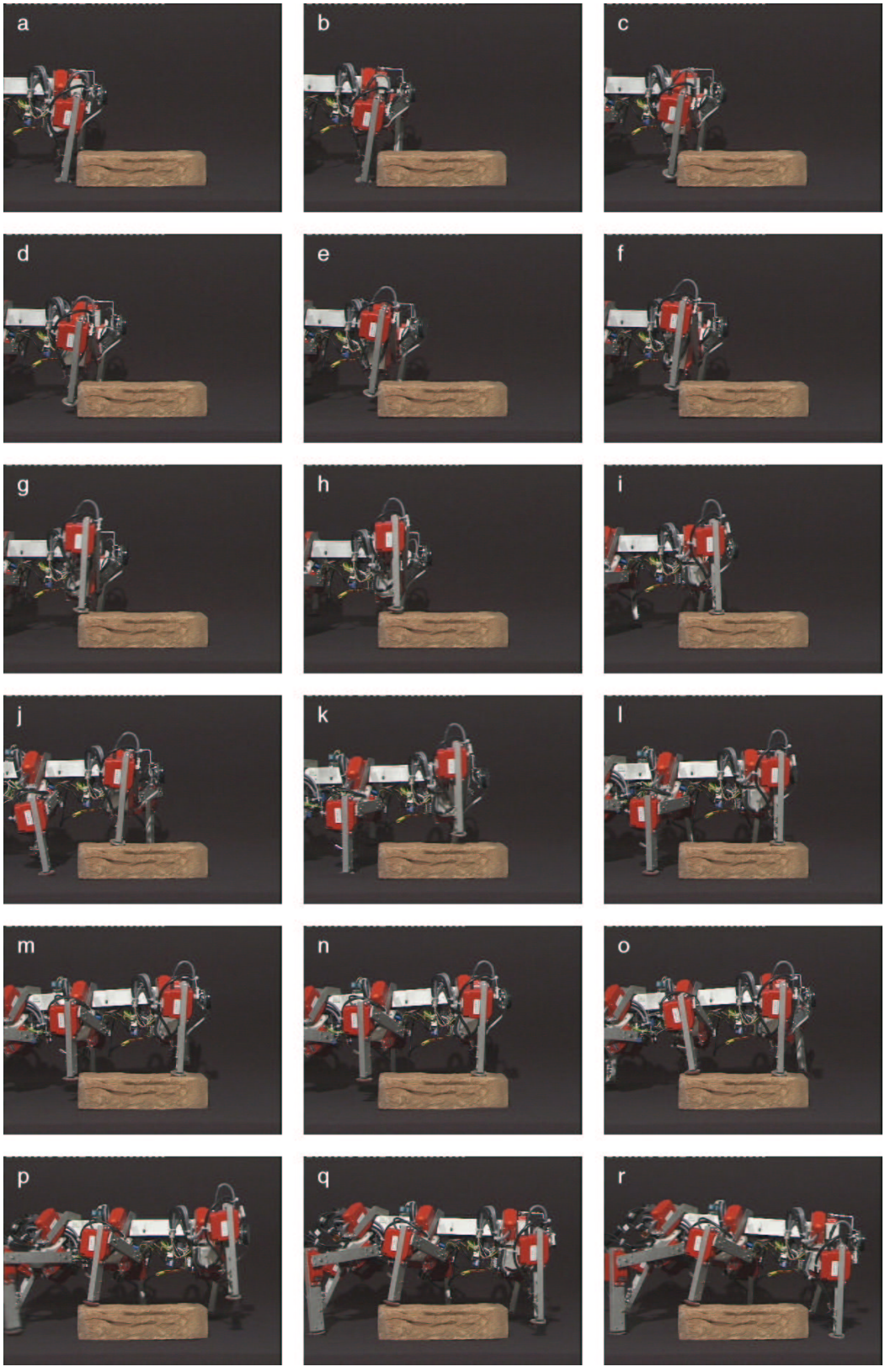


Abbildung 55: Überschreiten eines Hindernisses

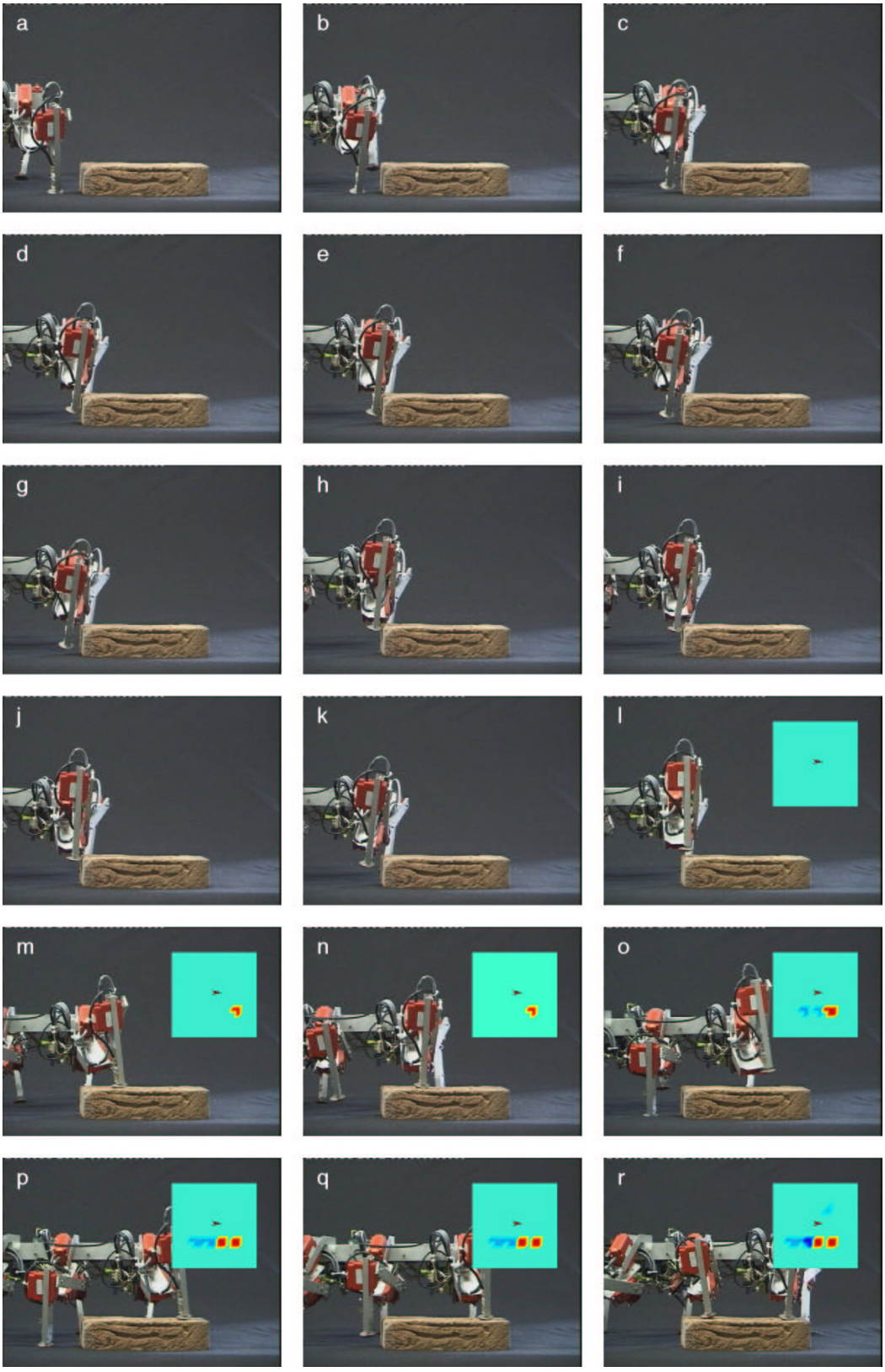


Abbildung 56: Überschreiten eines Hindernisses mit interner Karte

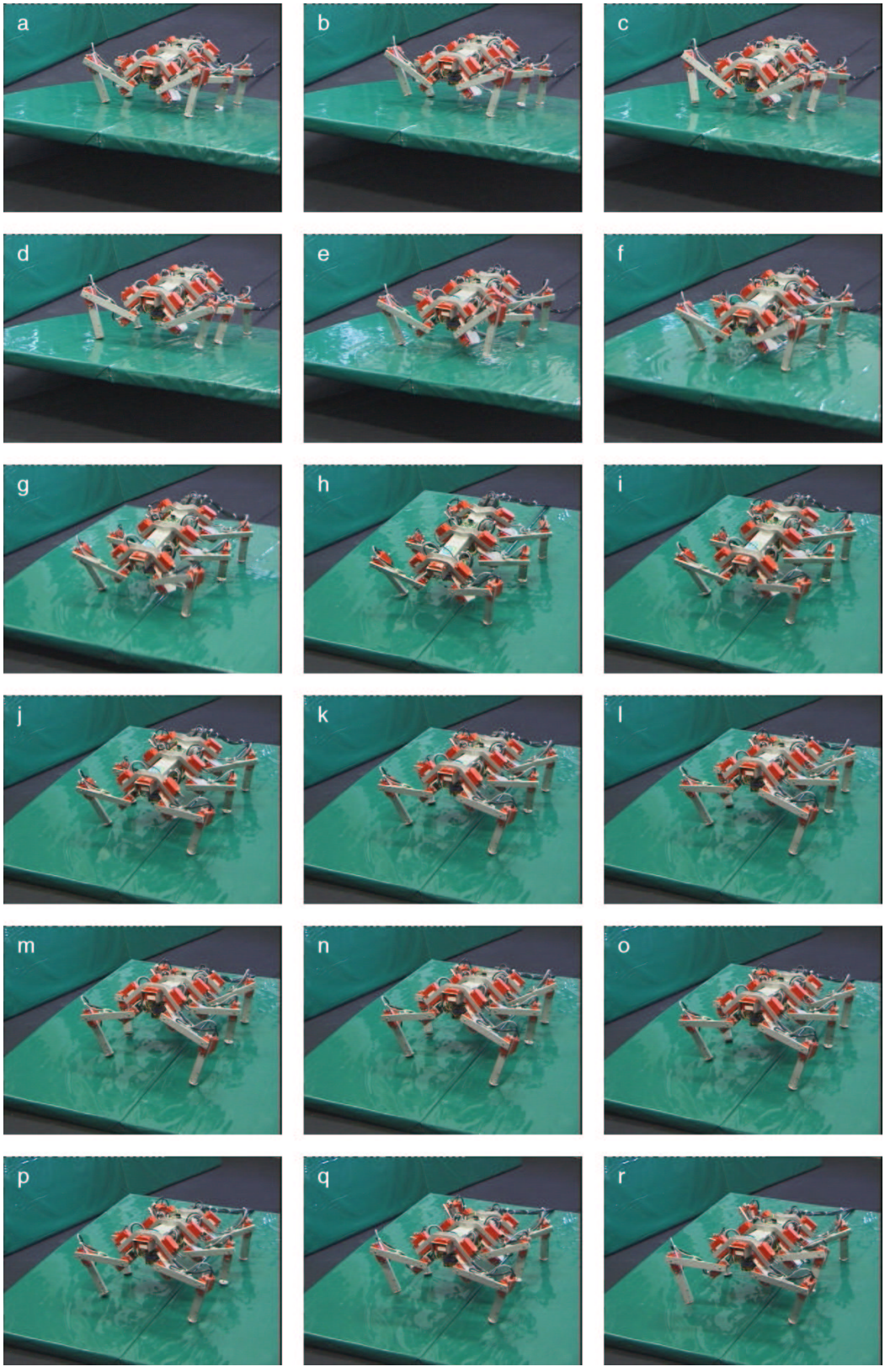


Abbildung 57: Überschreiten einer Wippe

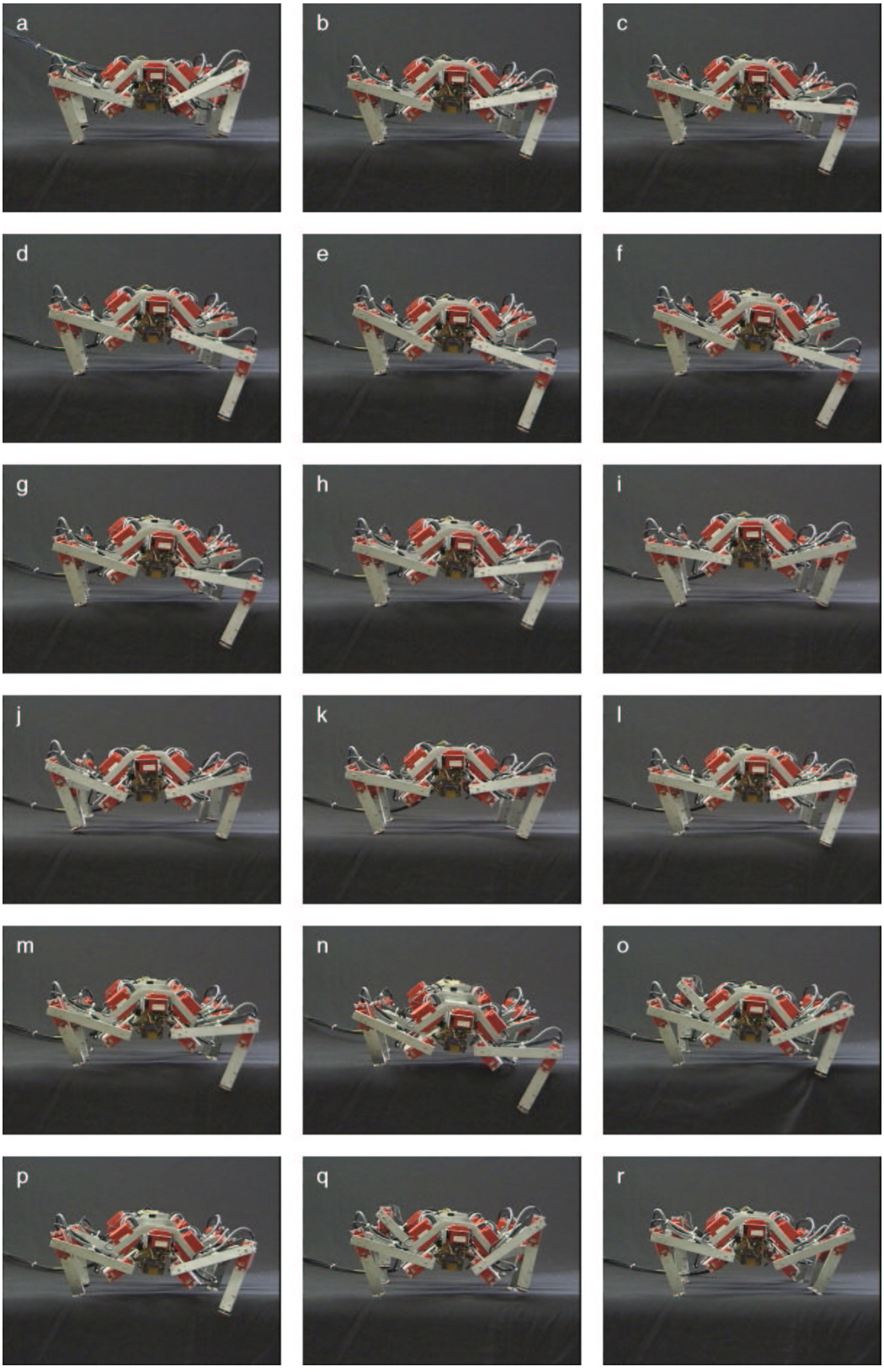


Abbildung 58: Bewegung an einer Kante und Rückzug

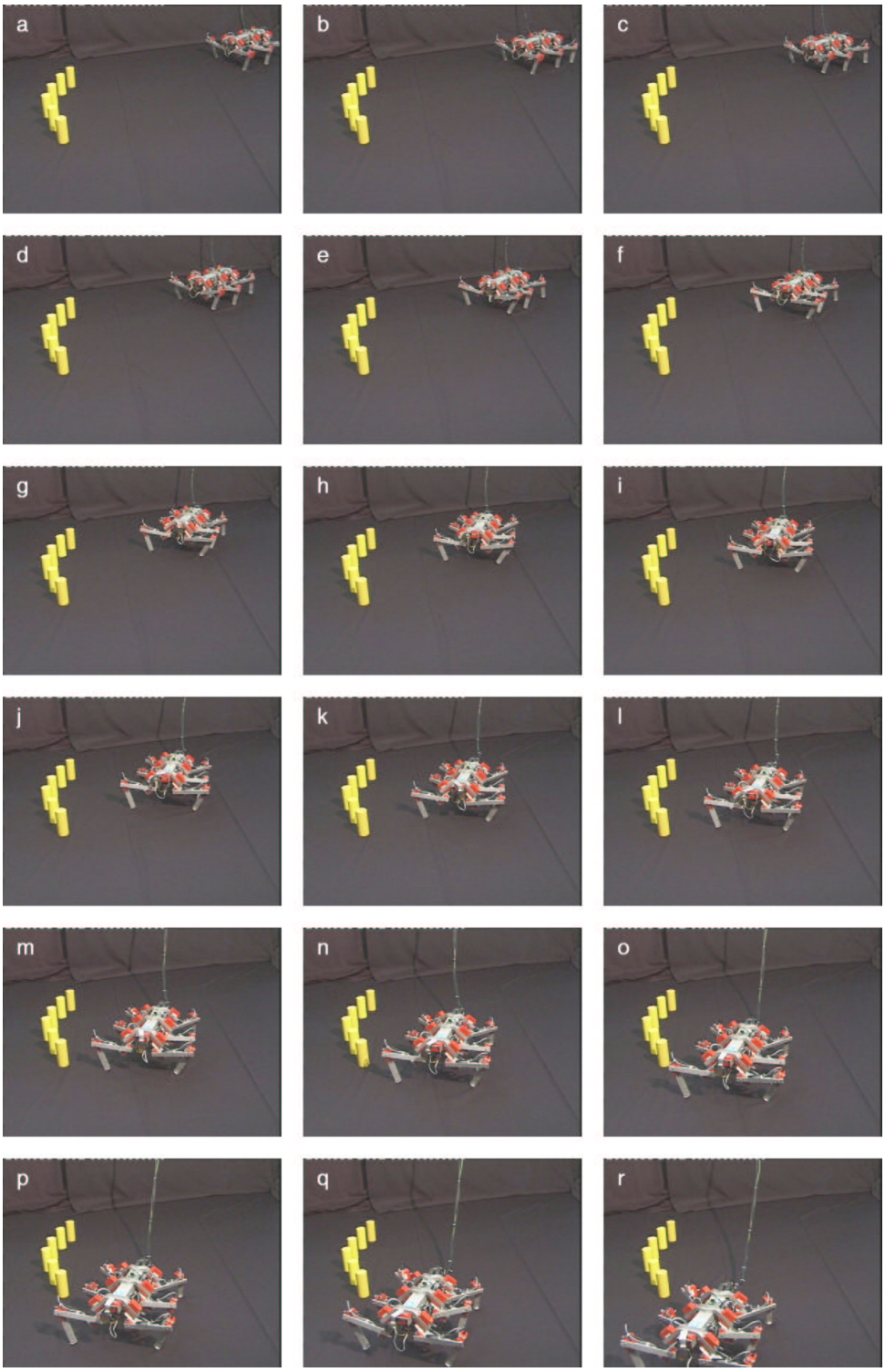


Abbildung 59: Ausweichbewegung vor einer Wand

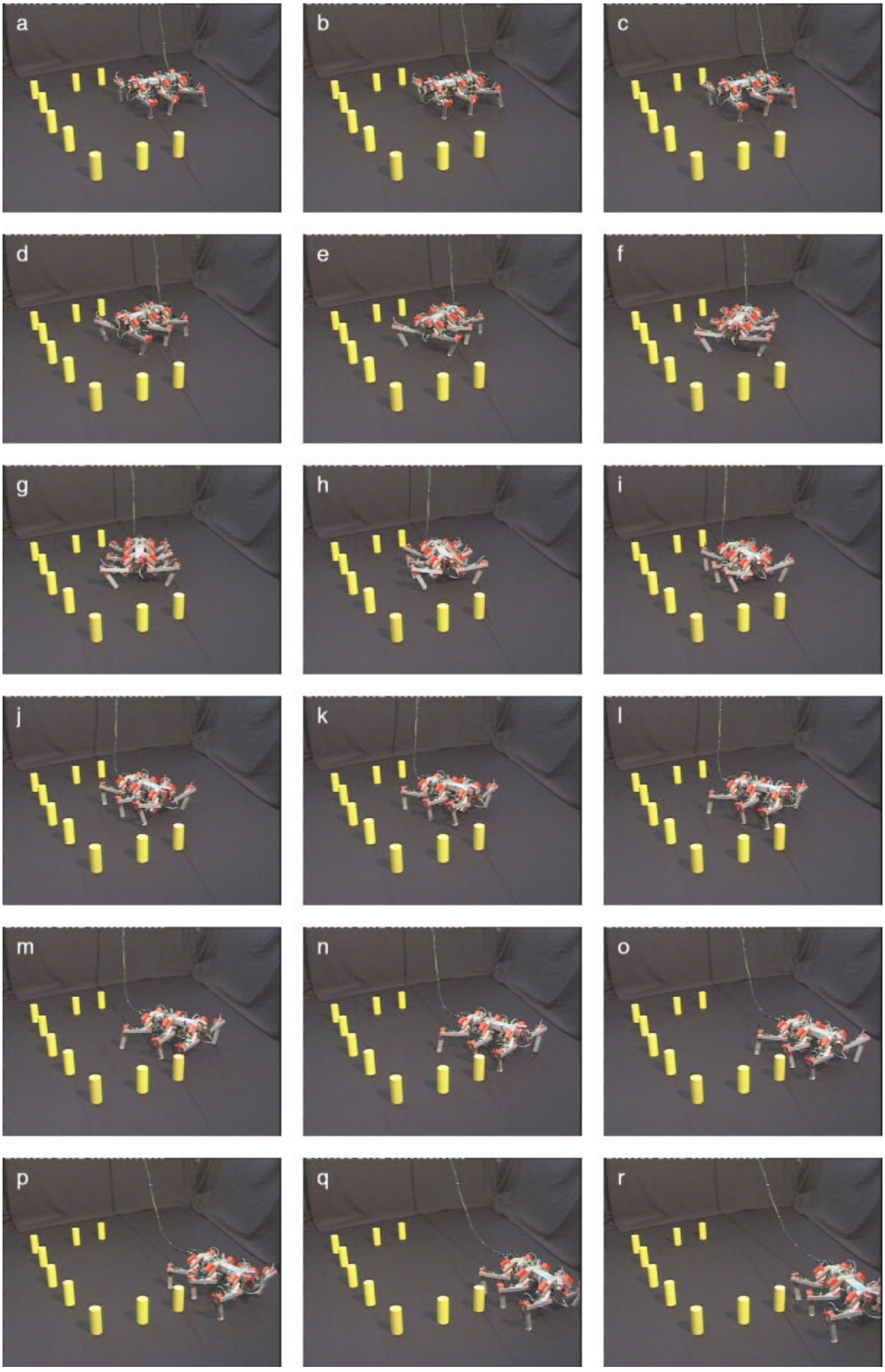


Abbildung 60: Ausweichbewegung in einem Korridor

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Konstruktion, der Bau und die Adaptivität von autonomen Gehmaschinen ist eine Aufgabe, die vielfältige und komplexe Problemstellungen bietet. Die Wechselwirkungen zwischen der Maschine und der kontrollierenden Software bergen verschiedene Möglichkeiten, sowohl für technische Probleme als auch für elegante Lösungen.

Diese Arbeit stellt eine Reihe von Gehmaschinen vor, die sukzessive verbessert und an ihre Umwelt angepaßt worden sind. Von dem stark am natürlichen Vorbild, der Stabheuschrecke *Carausius morosus*, ausgerichteten Modell TARRY I über den aus den Erkenntnissen des Vorgängers stark verbesserten TARRY II bis hin zur Gehmaschine TARRY IIA, die informationsautonom gebaut werden konnte. Bei den entwickelten Robotern ist das Hauptaugenmerk auf eine möglichst einfache Konstruktion gelegt worden. Die hohe Elastizität der Mechanismen wurde zugunsten eines geringen Gewichts in Kauf genommen. Die Maschinen und die implementierten Kommunikationsmechanismen sind dabei so aufgebaut, daß sie die Implementation anderer Kontrollmechanismen ermöglichen und unterstützen. Diese gesamte Entwicklung wird komplettiert durch den Einsatz einer Kopie von TARRY II zur experimentellen Überprüfung alternativer Koordinationsstrategien an der Universität Bielefeld.

Zusammen mit der Konstruktion ist die Sensorik der Roboter weiter verbessert worden. Dabei wurden zum einen die vorhandenen Sensoren optimiert, zum anderen wurde der Umfang der zur Verfügung stehenden Informationen erweitert, beispielsweise durch Einführung der Dehnungsmeßstreifen zur Belastungsmessung und des Accelerometers zur Messung der Inklination.

Die Berechnung der Gangmuster erfolgt mit Hilfe der am Fachgebiet Mechanik der Gerhard-Mercator-Universität entwickelten Bibliothek WALKINGLIB. Hiermit ist es möglich, für beliebige Maschinen mit mindestens zwei symmetrischen Beinpaaren analytisch korrekte Gelenkwinkelverläufe zu erzeugen. Um die notwendigen Rechenzeiten zu optimieren, werden neuronale Netzwerke trainiert, die bei einer reduzierten Anzahl von Parametern die Gelenkwinkel in einem Bruchteil der Zeit mit guter Genauigkeit approximieren.

Die Aufgabe der WALKINGLIB und der neuronalen Netze ist es, eine möglichst genaue und schnelle Berechnung der Gangmuster zu gewährleisten. Diese Berechnungen dienen als Basis für die adaptive Bewegungskoordination. Die autonome Bewegung in unbekanntem, unstrukturiertem Gelände bringt ein hohes Maß an Ungenauigkeiten mit sich, die durch die große Elastizität der verwendeten Roboter noch verstärkt wird. Als Möglichkeiten, trotz dieser Unsicherheiten eine autonome Fortbewegung zu ermöglichen, werden Reflexe und planende Module vorgestellt. Diese sind in der Lage, mit lokalen und globalen Reaktionen die Eingangsparameter der neuronalen Netzwerke der Situation entsprechend anzupassen. Die Reflexe stellen eine *ad-hoc* Reaktion auf bestimmte Reize dar und implementieren damit die

Fähigkeit zur unmittelbaren adaptiven Reaktion auf bestimmte Ereignisse. Beispiele hierfür sind das verfrühte oder verspätete Aufsetzen eines Fußes, die Kollision mit einem Hindernis oder das Anpassen der Körperneigung. Die planenden Module dienen dazu, vorhandene Informationen zu speichern, zu kombinieren und auszuwerten, beispielsweise mit einem internen Modell der Maschine. Dadurch ist es möglich, vorausschauende Aktionen zu implementieren, wie dies unter anderem mit der lokalen Umgebungskarte gezeigt worden ist.

Die Funktionsfähigkeit der einzelnen Elemente und ihrer Kombinationen sind in unterschiedlichen Experimenten und Demonstrationen während der Weiterentwicklung der Gehmaschinen erprobt und verbessert worden. Einige exemplarische Versuche sind in dieser Arbeit dokumentiert worden, um eine Vorstellung der realen Maschinen und ihrer Leistungsfähigkeit zu vermitteln.

Die Vorbilder aus der Natur und die Ergebnisse während der Entwicklung zeigen, daß zur erfolgreichen Adaption an die Umgebung weniger eine hohe „Rechenkapazität“ als viel mehr die günstige Kombination und Nutzung von Körperbau, Sensorik und Adaptionsstrategie entscheidend ist. Die vorgestellten Maschinen und Methoden haben dabei bewiesen, daß sie in der Lage sind, ein breites Spektrum verschiedener Umgebungen und Hindernisformen erfolgreich zu bewältigen.

Zur weiteren Verbesserung dieser Fähigkeiten der TARRY Gehmaschinen bieten sich folgende Arbeitsfelder an:

- Umstellung der Gehmaschine TARRY IIA auf einen optionalen Betrieb mit Akkumulatoren zur Erreichung von Energieautonomie,
- Ausbau der Strategie zur Verhinderung von Kollisionen mit großen Hindernissen, beispielsweise durch Kopplung mit der FINDPATH Bibliothek [Bus99] zur globalen Bahnplanung, und
- Einbau zusätzlicher Sensorik, beispielsweise zur Erkennung und Ortsbestimmung von Kollisionen.

Als wichtigste Weiterentwicklung kann allerdings die fortschreitende Nutzung und Kombination der Signale zur Verfügung stehender und hinzuzufügender Sensoren gesehen werden. Insbesondere durch den Einsatz von TARRY als kostengünstige und einfach zu nutzende Plattform für unterschiedliche Strategien sind hier weitere Erkenntnisse zu erwarten.

Literaturverzeichnis

[Ame95] AMENDT, Oliver: *Neuronale Steuerung eines insektenartigen Schreitroboters*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1995 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 483, Dissertation, Universität Duisburg). – ISBN 3–18–348308–4

[AWW+00] AYERS, J. ; WITTING, J. ; WILBUR, C. ; ZAVRACKY, P. ; MCGRUER, N. ; MASSA, D.: Biomimetic Robots for Shallow Water Mine Countermeasures. In: *Proceedings of the Autonomous Vehicles in Mine Countermeasures Symposium*, 2000

[Bak97] BAKER, Art: *The Windows NT Device Driver Book: A Guide for Programmers*. First Edition. Upper Saddle River, New Jersey : Prentice Hall, 1997. – ISBN 0–13–184474–1

[Bäs88] BÄSSLER, Ulrich: Steuerung von Laufbewegungen. In: *Verh. Dtsch. Zool. Ges.* 81 (1988), S. 47–57

[Ben90] BENSELER, Gustav E.: *Benselers griechisch-deutsches Wörterbuch*. 19., unveränderte Auflage. Leipzig : Verlag Enzyklopädie, 1990. – 125 S. – ISBN 3–324–00579–5

[Ber94] BERNS, Karsten: *Steuerungsansätze auf der Basis neuronaler Netze für sechsbeinige Laufmaschinen*. Sankt Augustin : Infix, 1994 (Dissertationen zur künstlichen Intelligenz, Band 61, Universität Karlsruhe). – ISBN 3–929037–61–0

[Ber01] BERNS, Karsten: *The Walking Machine Catalogue*. Universität Karlsruhe, `berns@fzi.de` : `http://www.fzi.de/divisions/ipt/WMC/preface/walking_machines_katalog.html`, 10.04.2001. – 19169 Bytes

[BFG+98] BUSCHMANN, Axel ; FRIK, Martin ; GUDDAT, Martin ; KARATAŞ, Michael ; LOSCH, Dirk C.: Modular generation and optimization of gait patterns for walking machines. In: *Autonomous Walking 98: Theory and Practical Realisation of Walking Machines* Fraunhofer IFF – Workshop, Magdeburg, Germany, 1998, S. 7–14

[Bro72] *Brockhaus Enzyklopädie in zwanzig Bänden*. Bd. 15. 17. völlig neubearbeitete Auflage. Wiesbaden : F. A. Brockhaus, 1972. – 280 S. – ISBN 3–8023–1574–X

[Bro91] BROOKS, Rodney A.: Intelligence Without Reason. In: MYOPOULOS, JOHN; REITER, Ray (Hrsg.): *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Sydney, Australia : Morgan Kaufmann, 1991. – ISBN 1–55860–160–0, S. 569–595

[Bus99] BUSCHMANN, Axel: *Komponenten der globalen Bahnplanung für Schwerlasthandhabungssysteme*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1999 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 785, Dissertation, Universität Duisburg)

[CBD+95] CRUSE, H. ; BARTLING, Ch. ; DREIFERT, M. ; SCHMITZ, J. ; BRUNN, D. E. ; DEAN, J. ; KINDERMANN, T.: Walking: A Complex Behavior Controlled by Simple Networks. In: *Adaptive Behavior* 3 (1995), Nr. 4, S. 385–418

[CKS+98] CRUSE, Holk ; KINDERMANN, Thomas ; SCHUMM, Michael ; DEAN, Jeffrey ; SCHMITZ, Josef: Walknet - a biologically inspired network to control six-legged walking. In: *Neural Networks* 11 (1998), Nr. 7-8, S. 1435–1447

[Cru76] CRUSE, Holk: The Function of the Legs in the Free Walking Stick Insect, Carausius Morosus. In: *Journal of Comparative Physiology* A 112 (1976), S. 235–262

[Cus93] CUSTER, Helen: *Inside Windows NT*. Redmond, Washington : Microsoft Press, 1993. – ISBN 1–55615–481–X

[DGG+83] DEVJANIN, E. A. ; GURFINKEL, V. S. ; GURFINKEL, E. V. ; KARTASHEV, V. A. ; LENSKY, A. V. ; SHNEIDER, A. Y. ; SHTILMAN, L. G.: The six–legged walking robot capable of terrain adaptation. In: *Mechanism and Machine Theory* 18 (1983), Nr. 4, S. 257–260

[FBG+00a] FRIK, Martin ; BUSCHMANN, Axel ; GUDDAT, Martin ; KARATAŞ, Michael ; LOSCH, Dirk C.: Autonomous Locomotion of Walking Machines in Rough Terrain. In: MORECKI, Adam (Hrsg.) ; BIANCHI, Giovanni (Hrsg.) ; RZYMKOWSKI, Cezary (Hrsg.): *Ro.Man.Sy 13 - Proceedings of the Thirteenth CISM-IFToMM Symposium, Zakopane, Poland*. Wien, New York : Springer, Juli 2000 (CISM Courses and Lectures 422). – ISBN 3–211–83333–1, S. 331–338

[FBG+00b] FRIK, Martin ; BUSCHMANN, Axel ; GUDDAT, Martin ; KARATAŞ, Michael ; LOSCH, Dirk C.: Generation, evaluation and visualisation of gait patterns for walking machines. In: ISERMANN, R. (Hrsg.): *1st IFAC-Conference on Mechatronic Systems* Bd. 2. Darmstadt, Germany : International Federation of Automatic Control (IFAC), September 2000, S. 635–640

[FGKL99] FRIK, Martin ; GUDDAT, Martin ; KARATAŞ, Michael ; LOSCH, Dirk C.: A novel approach to autonomous control of walking machines. In: VIRK, G. S. (Hrsg.) ; RANDALL, M. (Hrsg.) ; HOWARD, D. (Hrsg.): *Proceedings*

of the 2nd International Conference on Climbing and Walking Robots CLAWAR 99, 13–15 September, Portsmouth, UK. Bury St. Edmunds : Professional Engineering Publishing, 1999, S. 333–342

[FGLK98] FRIK, Martin ; GUDDAT, Martin ; LOSCH, Dirk ; KARATAŞ, Michael: Terrain Adaptive Control of the Walking Machine TARRY II. In: *Proc. European Mechanics Colloquium, Euromech 375 – Biology and Technology of Walking*. Munich, Germany, 1998, S. 108–115

[Fin94] FINNEGAN, James: Building Windows NT-Based Client/Server Applications Using Remote Procedure Calls. In: *Microsoft System Journal* (1994), Nr. 10

[GF00] GUDDAT, Martin ; FRIK, Martin: Control of Walking Machines with Artificial Reflexes. In: *Advanced Motion of Animals and Machines*. Montreal, Canada, August 2000

[HM00] HILLER, M. ; MÜLLER, J.: Design und Realisierung des autonomen Schreitfahrwerks ALDURO. In: *VDI-Bericht Nr. 1533: Mechatronik — Mechanisch / Elektrische Antriebstechnik*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 29.–30. März 2000, S. 323–334

[HWF00] HACKERT, R. ; WITTE, H. ; FISCHER, Ms S.: Interaction between motions of the trunk and the limbs and the angle of attack during synchronous gaits of the pika (Ochontona rufescens). In: *Advanced Motion of Animals and Machines*. Montreal, Canada, August 2000

[Kle99] KLEUTGES, Markus: *Modellierung elastischer Handhabungssysteme in der globalen Bahnplanung*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1999 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 768, Dissertation, Universität Duisburg)

[Köh90] KÖHLE, Monika: *Neurale Netze*. Wien : Springer, 1990. – ISBN 3–211–82220–8

[MB01a] MCCORDIE, D. ; BUEHLER, M.: Towards Pronking with a Hexapod Robot. In: BERNS, K. (Hrsg.) ; DILLMANN, R. (Hrsg.): *Proceedings of the 4th International Conference on Climbing and Walking Robots CLAWAR 2001, 24–26 September, Karlsruhe, Deutschland*, 2001, S. 659–666

[MB01b] MOORE, E. Z. ; BUEHLER, M.: Stable Stair Climbing in a Simple Hexapod Robot. In: BERNS, K. (Hrsg.) ; DILLMANN, R. (Hrsg.): *Proceedings of the 4th International Conference on Climbing and Walking Robots CLAWAR 2001, 24–26 September, Karlsruhe, Deutschland*, 2001, S. 603–610

[MS-96] Microsoft Windows NT 4.0, Hilfedateien Device Driver Kit (DDK). August 1996

[NQBF97] Nelson, G. M. ; Quinn, R. D. ; Bachmann, R. J. ; Flannigan, W. C.: Design and Simulation of a Cockroach-like Hexapod Robot. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, USA, April*, 1997

[Omr00] Omron Electronics GmbH. Elisabeth-Selbert-Str. 17, 40764 Langenfeld: *Omron Electronic Components*. 2. 2000. – S. 176ff.

[PC/01] PC/104 Embedded Consortium: *PC/104 Specification*. v2.4. August 2001. – Internet: http://www.pc104.org

[Pie96] Piekenbrock, Stefan: *Reaktive Steuerung einer sechsbeinigen Laufmaschine in unbekannter Umgebung*. Aachen : Shaker Verlag, 1996 (Berichte aus der Informatik). – ISBN 3–8265–1313–4

[Pra00] Pratt, Jerry E.: *Exploiting Inherent Robustness and Natural Dynamics in the Control of Bipedal Walking Robots*, Massachusetts Institute of Technology, Dissertation, 2000

[PWD91] Pfeiffer, F. ; Weidemann, H.-J. ; Danowski, P.: Dynamics of the Walking Stick Insect. In: *IEEE Control Systems*, 1991, S. 9–13

[PWD+95] Pratt, Gill A. ; Williamson, Matthew M. ; Dillworth, Peter ; Pratt, Jerry ; Uhland, Karsten ; Wright, Anne: Stiffness Isn't Everything. Stanford, California, USA, June 1995

[QNB+01] Quinn, R. D. ; Nelson, G. M. ; Bachmann, R. J. ; Kinsley, D. A. ; Offi, J. ; Ritzmann, R. E.: Insect Designs for Improved Robot Mobility. In: Berns, K. (Hrsg.) ; Dillmann, R. (Hrsg.): *Proceedings of the 4th International Conference on Climbing and Walking Robots CLAWAR 2001, 24–26 September, Karlsruhe, Deutschland*, 2001

[Rem91] Remane, Adolf: *Systematische Zoologie / begr. von Adolf Remane; Volker Storch; Ulrich Welsch. Fortgef. von Volker Storch und Ulrich Welsch*. 4., bearb. Auflage. Stuttgart, New York : Gustav Fischer Verlag, 1991. – ISBN 3–437–20464

[RT93] Rosenberry, Ward ; Teague, Jim: *Distributing Applications Across DCE and Windows NT*. First Edition. Sebastopol, Kalifornien : O'Reilly & Associates, Inc., 1993. – 274 S. – ISBN 1–56592–047–3

[Sch97] Schmidt, Wolf-Dieter: *Elektronik*. Bd. 8 : Sensorschaltungstechnik. 1. Auflage. Würzburg : Vogel, 1997. – 280 S. – ISBN 3–8023–1574–X

[Sch98] SCHMUSCH, Wolfgang: *Elektronik*. Bd. 6 : Elektronische Meßtechnik. 4. Auflage. Würzburg : Vogel, 1998. – 512 S. – ISBN 3–8023–1769–6

[SP98] STEUER, Josef ; PFEIFFER, Friedrich: Autonomous Control of a Six-Legged Walking Machine. In: *Proc. European Mechanics Colloquium, Euromech 375 – Biology and Technology of Walking*. Munich, Germany, 1998

[SSI96] SCHMUCKER, U. ; SCHNEIDER, A. ; IHME, T.: Six-legged robot for service operations. In: *EUROBOT 96, Kaiserslautern*, 1996

[VM99] VISCAROLA, Peter G. ; MASON, W. A.: *Windows NT Device Driver Development*. First Edition. Macmillan Technical Publishing U.S.A, 1999

[Wei93] WEIDEMANN, Hans-Jürgen: *Dynamik und Regelung von sechsbeinigen Robotern und natürlichen Hexapoden*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1993 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 362)

[WHI+00] WITTE, H. ; HACKERT, R. ; ILG, W. ; BILTZINGER, J. ; SCHILLING, N. ; BIEDERMANN, F. ; JERGAS, M. ; PREUSCHOFT, H. ; FISCHER, Ms S.: Quadrupedal Mammals as Paragons for Walking Machines. In: *Advanced Motion of Animals and Machines*. Montreal, Canada, August 2000

[Zel94] ZELL, Andreas: *Simulation Neuronaler Netze*. Addison-Wesley Publishing Company, 1994