

Aus dem Institut für Technische Informatik der Universität zu Lübeck

Direktor:
Prof. Dr.-Ing. Erik Maehle

Eine Organic Computing basierte Steuerung für einen hexapoden Laufroboter unter dem Aspekt reaktiver Zuverlässigkeit und Robustheit

Inauguraldissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde (Dr.-Ing.)
der Universität zu Lübeck
- Aus der Technisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät -

vorgelegt von
Dipl.-Inform. Adam-Pharaoun El Sayed Auf
aus Fontenay-sous-Bois

Lübeck 2010

Erster Berichtstatter:
Zweiter Berichtstatter:

Prof. Dr.-Ing. Erik Maehle
Prof. Dr.-Ing. Andreas Schlaefer

Tag der mündlichen Prüfung:

31. August 2010

Zum Druck genehmigt,
Lübeck, den 9. September 2010

Danksagung

Ein großer Dank gebührt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Erik Maehle für die Chance, die Förderung und das Vertrauen in meine wissenschaftliche Arbeit.

Ein herzlicher Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Schlaefer für die kurzfristige Übernahme des Koreferats.

Besonderer Dank gilt Carsten Albrecht und Peggy Baudach, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit aktiv unterstützt haben und mir zur Seite standen. Julia Wirtz danke ich für die kurzfristige Unterstützung bei der Fertigstellung meiner Arbeit.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei den Studierenden, Nico Dudek, Nicolaus Ammann, Stefan Lembke und Tobias Witt, die mich mit ihrer Arbeit unterstützt haben und meiner Arbeit neue Impulse gegeben haben.

Darüber hinaus danke ich meinen Kollegen Marek Litza und Florian Mösch, die mir den Einstieg in die wissenschaftliche Arbeitswelt sehr leicht gemacht haben und mich bei meinen ersten Ideen zu meiner Arbeit unterstützt haben. Christoph Osterloh, Raphael Maas, Roman Koch, Stephan Krannich, Svetlana Larionova, Prof. Dr.-Ing Thilo Pionteck und Volker Hampel danke ich sowohl für fachliche als auch allgemeine Diskussionen und Unterstützung, für die tägliche gute Arbeitsatmosphäre und das freundschaftliche Miteinander.

Meinen Eltern danke ich von ganzem Herzen für die lebenslange Unterstützung in allen Belangen sowie für ihr Interesse und ihre aktive Unterstützung bei dieser Arbeit.

Zusammenfassung

Derzeit basieren unsere terrestrischen Fortbewegungsmittel, Transportmittel sowie Erkundungsgeräte hauptsächlich auf radgetriebenen Maschinen. Allerdings ist etwa die Hälfte der Landmasse unseres Planeten für radgetriebene Fahrzeuge unpassierbar. Laufende Maschinen könnten zu der Erschließung bisher unerschlossener Gebiete beitragen. Durch die Mobilität eines Läufers und seine Anpassungsfähigkeit an wechselnde Eigenschaften des Untergrunds bietet das Laufen wichtige Vorteile in schwierigem Gelände.

Seit mehreren Jahrzehnten wird bereits an Laufmaschinen geforscht. Doch obwohl biologische, laufende Organismen allgegenwärtig sind, wurde die Neugierde für biologische Organismen als Vorbild für Laufroboter erst in den letzten zwanzig Jahren geweckt. Die Studien an biologischen Organismen, wie zum Beispiel Insekten, rückten in den Fokus der Wissenschaftler, um den Prinzipien des Laufens auf den Grund zu gehen. Spielten in den ersten Jahren die neuronalen Verknüpfungen und die zugrundeliegenden Kontrollstrukturen für die Beinbewegung und die Beincoordination eine große Rolle, stellte sich in den letzten Jahren immer deutlicher heraus, dass auch spezifische Eigenschaften von Muskeln, Sehnen und Gelenken einen wichtigen Beitrag zu dem anpassungsfähigen Laufverhalten biologischer Organismen leisten.

In dieser Arbeit wird eine dezentrale, reflexbasierte Kontrollstruktur für das Laufen mit einem sechsbeinigen Roboter vorgestellt und auf ihre Anpassungsfähigkeit, ihre Zuverlässigkeit und ihre Robustheit überprüft. Die Arbeit basiert auf dem ORCA-Konzept, welches im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms Organic Computing entwickelt wurde. Nach Einführung der Laufmuster-generierung werden verschiedene Reflexe vorgestellt, die das Laufen in schwierigem Gelände unterstützen. Darüber hinaus wird durch kontrollierte Störungen des Laufverhaltens die Robustheit des Systems evaluiert.

Neben der Entwicklung einer biologisch inspirierten Laufsteuerung liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Erweiterung der Steuerung durch ergänzende, propriozeptive Reflexe auf Beinebene für die Hindernisüberwindung und der Steigerung der Robustheit bei starken Störungen. Zusätzlich werden Reflexe untersucht, die auf Gelenkebene aktiviert werden und untereinander kombiniert als Reaktion auf externe Krafteinwirkung ebenfalls ein Laufverhalten auslösen können.

Die Auswertung der vorgestellten Konzepte erfolgt anhand verschiedener Testläufe der Roboterplattform unter kontrollierten Bedingungen. Eine Analyse, Auswertung und Einordnung der Ergebnisse basiert auf während der Testläufe aufgezeichneten Daten.

Abstract

Today's terrestrial means of transportation and exploration are mainly based on wheeled machines. Nevertheless, about half of our planet's land mass is impassable for wheeled machines. Walking machines can contribute exploiting areas that are unexploited so far. Walking machines bring important advantages along based on their mobility as well as on their adaptivity regarding the ground's changing properties.

Scientists have been researching on walking machines for decades. Although biological walking organisms are all over the curiosity for biological organisms as model for walking machines was stirred up about twenty years ago. Studies on biological organisms like insects became more interesting for scientists doing research on the principles of walking. Whereas in the first years the neuronal connections and the underlying control structures for leg movements and leg coordination were very important, during the last years the specific characteristics of muscles, sinews, and joints became more and more important for the biological organism's adaptive walking.

In this thesis a decentralised, reflex-based control structure for walking with a six-legged robot is introduced and its adaptivity, its dependability as well as its robustness are analysed. The thesis is based on the OCRA-concept developed within the DFG priority program Organic Computing. Following the walking pattern's introduction different reflexes supporting walking in difficult terrain are presented. Moreover, the control system's robustness is evaluated by controlled disturbances of the walking behaviour.

Besides developing a biologically inspired control structure for walking this work is focused on the control structure's extension by additional, proprioceptive leg reflexes for overcoming obstacles as well as increasing the system's robustness for strong disturbances. Furthermore, combined joint reflexes reacting to an external force and also generating a walking behavior are investigated.

The presented concepts are evaluated by different controlled experiments and trials with the robotic platform. The results analysis, evaluation as well as their classification are based on data recorded during the trials.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziel und Aufbau dieser Arbeit	2
2	Stand der Technik	5
2.1	Historische Entwicklung	5
2.2	Autonome mobile Roboter	6
2.3	Entwicklungsprognosen	8
2.4	Anwendungsgebiete für Laufmaschinen	9
2.5	Aktueller Stand der Forschung	11
3	Biologisch inspirierte Steuerungsprinzipien	21
3.1	WALKNET - ein Ansatz der biologischen Kybernetik	23
3.2	Das Software-Framework MCA2	26
3.3	ORCA	28
3.3.1	Organic Computing	28
3.3.2	Die Kontrollarchitektur	30
4	Die sechsbeinige Robotertestplattform	35
4.1	Robotertestplattform OSCAR	35
4.1.1	Aufbau und Skelett	36
4.1.2	Aufbau der Beine	36
4.1.3	Aktoren und Elektronik	37
4.2	Physikalische 3D-Simulation	39
5	Kontrollarchitektur - BCU Implementierungen	45
5.1	Dezentrales Laufen	46
5.1.1	Beinsteuerung	46
5.1.2	Beinkoordination	48
5.1.3	Laufmuster	51
5.2	Kurvenlaufen	55
5.2.1	Konzept	56
5.2.2	Lokale Kommunikation	57
5.3	Adaptives Laufen	58
5.3.1	Reflexe	59
5.3.2	Gelenknachgiebigkeit	59

5.3.3	Schrittreflex	65
5.3.4	Reflexbasiertes Laufen	70
5.3.5	Reflexe auf Beinebene	76
5.3.6	Bodendetektionsreflex	77
5.3.7	Suchreflex	82
5.3.8	Levatorreflex	89
5.3.9	Kombination der Reflexe	96
5.4	Zusammenfassung	100
6	Kontrollarchitektur - OCU Implementierungen	103
6.1	Anomalieklassifikation	103
6.2	Reaktionen auf langfristige Anomalien	106
6.2.1	Beinausfall	106
6.2.2	Ausfall von zwei Beinen	113
6.2.3	Zielfolgeverhalten mit Beinausfall	116
6.2.4	Eingriff einer OCU	123
7	Fazit und Ausblick	129
7.1	Ergebnisse der Arbeit	129
7.2	Ausblick	130
A	Anhang	131
A.1	Schrittreflex	132
A.2	Bodendetektion	133
A.3	Suchreflex	134
A.3.1	Bodendetektion im Zustand „Suche Vorne“	134
A.3.2	Keine Bodendetektion	135
	Literaturverzeichnis	IX
	Lebenslauf	XIX
	Eigene Publikationen	XXI

Kapitel 1

Einleitung

Inhalt

1.1	Motivation	1
1.2	Ziel und Aufbau dieser Arbeit	2

1.1 Motivation

Die radgetriebene Fortbewegung im direkten Vergleich zum Laufen als natürliche Fortbewegung besticht durch Geschwindigkeit und die Transportmöglichkeit hoher Nutzlasten. Geschwindigkeiten, die durch die radgetriebene Fortbewegung erreicht werden, liegen für einen Läufer weit außerhalb seiner Möglichkeiten. Auch die Nutzlasten, die mit einem radgetriebenen Fahrzeug transportiert werden können, liegen weit über der Belastbarkeit eines in der Größe vergleichbaren Läufers. Der Preis dafür ist eine komplexe Infrastruktur in Form von Straßen- und Schienennetzen. Unübersichtliches und hindernisreiches Gelände bleibt für Radfahrzeuge unpassierbar. Laut Rosheim ist in etwa die Hälfte der Landmasse unseres Planeten für radgetriebene Fahrzeuge unpassierbar [101].

Laufende Systeme, wie biologische Organismen, können sich in den größten Teilen dieser Gebiete scheinbar mühelos fortbewegen. Die Erschließung dieser bisher unerschlossenen Gebiete mittels einer bodengebundenen Fortbewegung setzt die Entwicklung robuster und leistungsfähiger Laufmaschinen voraus.

Der große Vorteil von Laufmaschinen gegenüber radgetriebenen Fahrzeugen liegt in den minimalen Anforderungen, die Läufer an ihre natürliche Umgebung oder teils vorhandene Infrastruktur stellen. Läufer überzeugen durch ihre Mobilität und ihre Manövrierfähigkeit. Sie überwinden hohe Hindernisse, steigen Treppen und überwinden Lücken. Sie können die Aufsatzpunkte ihrer Füße variabel wählen und sich an Höhenunterschiede des Untergrunds anpassen. Beine können aktiv als Manipulatoren genutzt werden und der Körper kann als tragende Plattform frei im Raum positioniert werden [112]. Der Preis für diese Vorteile ist die hohe Komplexität des Bewegungsapparats eines Läufers, der sich durch mehrsegmentige Gliedmaßen mit vielen Freiheitsgraden und durch zahlreiche Sensoren auszeichnet. Die Herausforderung bei der Beherrschung einer Laufmaschine liegt in der Koordination der Gelenke und Gliedmaßen, in der Verarbeitung der Sensorsignale und der Steuerung des Gesamtverhaltens. Dabei werden hohe Anforderungen an die Laufsteuerung gestellt.

Natürliches Laufen in einer unübersichtlichen und hindernisreichen Umwelt basiert auf der ständigen Interaktion des Läufers mit seiner Umgebung. Eine Laufsteuerung muss die Gelenke und Gliedmaßen eines Läufers in jeder Situation, abhängig von den aktuellen Sensorsignalen, koordinieren. Die Vielzahl an Möglichkeiten, mit der unwegsames Gelände durchlaufen werden kann, erschwert die Aufgaben der Laufsteuerung zusätzlich. Unter diesen Umständen werden wichtige Anforderungen an eine Laufsteuerung gestellt. Eine Laufsteuerung muss adaptiv auf die Umwelt reagieren können, sie muss *zuverlässig* sein, in jeder Situation den stabilen Stand des Läufers sichern und sie muss *robust* sein sowie auf auftretende Fehlfunktionen des Läufers reagieren können.

1.2 Ziel und Aufbau dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer biologisch inspirierten, reaktiven Steuerung für sechsbeiniges Laufen und die Untersuchung von Adaptivität, Zuverlässigkeit und Robustheit dieser Steuerung auf einer einfachen Roboterplattform. Die Steuerung basiert soweit möglich auf propriozeptorischen Sensorsignalen.

Die zentrale Frage dieser Arbeit befasst sich mit der Zuverlässigkeit beim Einsatz der Roboterplattform in hindernisreichem Gelände. Dabei werden selbstorganisierende und emergente Prinzipien im Rahmen eines Organic Computing-Ansatzes untersucht und analysiert. Biologisch inspirierte Reflexe werden zur Zuverlässigkeitssteigerung eingesetzt. Die Robustheit der Steuerung wird durch Experimente mit gezielten, einschränkenden Störungen des Bewegungsapparats untersucht.

Die Arbeit gliedert sich in drei Teile: Einführung in das Softwareframework ORCA und die Roboterplattform OSCAR, Umsetzung und Untersuchung der adaptiven und zuverlässigen Eigenschaften der Laufsteuerung und die Untersuchung auf Robustheit und die Einführung von Erweiterungen.

Kapitel 2 führt in das Gebiet der autonomen mobilen Roboter ein und stellt die historische Entwicklung der autonomen mobilen Robotik mit einer anschließenden Definition vor. Nach einer allgemeinen Entwicklungsprognose für die Servicerobotik und die mobile Robotik werden die Anwendungsgebiete sechsbeiniger Laufmaschinen aufgezeigt. Abschließend wird auf den aktuellen Stand der Forschung eingegangen.

Kapitel 3 gibt einen Einblick in biologisch inspirierte Steuerungsprinzipien. Nach der Einführung des Walknets, einem Ansatz aus der biologischen Kybernetik, wird das Software-Framework MCA2 vorgestellt. Abschließend wird die in dieser Arbeit eingesetzte Architektur ORCA eingeführt und in diesem Rahmen das Forschungsgebiet Organic Computing vorgestellt.

Kapitel 4 beschreibt die Roboterplattform OSCAR. Es wird auf den mechanischen Aufbau und die Einzelkomponenten eingegangen, sowie auf die Aktorik und die Simulation.

Kapitel 5 führt die dezentrale Laufsteuerung ein und stellt ihre Umsetzung und ihre

selbstorganisierenden Eigenschaften vor. Es werden die Konzepte lokaler Kommunikation und emergenter Schrittmuster erläutert. Anschließend werden biologisch inspirierte Reflexe auf Gelenk- und Beinebene ergänzt und das Gesamtsystem auf seine Zuverlässigkeit untersucht.

Kapitel 6 führt eine Anomalieklassifikation ein. Der Bewegungsapparat des Systems wird gezielt mit definierten Anomalien gestört und die Steuerung auf ihre Robustheit überprüft. Zusätzlich werden neue Komponenten eingeführt, die in die Steuerung eingreifen können, um auf detektierte Anomalien zu reagieren und die Robustheit des Systems zu verstärken.

Abschließend werden in **Kapitel 7** die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert. Es werden offene Fragen besprochen, die aufgrund des komplexen Themenfeldes dieser Arbeit nicht oder nur unzureichend behandelt werden konnten.

Kapitel 2

Stand der Technik

Inhalt

2.1	Historische Entwicklung	5
2.2	Autonome mobile Roboter	6
2.3	Entwicklungsprognosen	8
2.4	Anwendungsgebiete für Laufmaschinen	9
2.5	Aktueller Stand der Forschung	11

2.1 Historische Entwicklung

Einer der ersten mobilen Automaten, auf den historische Quellen verweisen, stellt die Taube von Tarent dar, entworfen und gebaut von Archytas von Tarent (ca. 420 v. Chr). Die Bewegungssteuerung dieser hölzernen Taube basiert laut der verweisenden Quellen auf Luftströmungen sowie Druckluft. Etwa 100 Jahre später formulierte der griechische Philosoph Aristoteles einen Wunsch, der nach heutiger Terminologie dem Wunsch nach einem intelligenten mobilen Roboter entspricht: *„Wenn jedes Werkzeug auf Geheiß, oder auch vorausahnend das ihm zukommende Werk verrichten könnte, ..., so bedürfte es weder für den Werkmeister der Gehilfen, noch für die Herren der Sklaven.“*

In der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts entwarf das italienische Universalgenie Leonardo da Vinci, neben zahlreichen Maschinen, unter anderem auch das erste autonome mobile Fahrzeug - das Automobil von Leonardo da Vinci. In dem Buch „Leonardo's Lost Robots“ [102] erläutert der Autor Mark Elling Rosheim vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) seine Analysen und die Rekonstruktion von da Vincis mobilen Automaten. Es ist sogar möglich, das aus Holz, Seilzügen und Federn bestehende rekonstruierte Fahrzeug zu programmieren. Als mechanischen Energiespeicher setzte da Vinci eine Spiralfeder ein, die nach dem Aufziehen als Federmotor diente. Zur Programmierung von Geschwindigkeit und zu fahrender Trajektorie benutzte da Vinci austauschbare Nocken verschiedener Größe, mit denen die zwei Antriebsräder unterschiedlich stark abgebremst werden konnten.

Aus heutiger Sicht entwickelte Leonardo da Vinci bereits vor 500 Jahren den ersten autonomen mobilen Roboter, der rekonstruiert werden kann. Der Begriff Roboter wurde allerdings erst über 400 Jahre später als neue Wortschöpfung bekannt. Die Wortschöpfung

„Roboter“ und auch die Wortschöpfung „Automat“ gehen auf den tschechischen Künstler Josef Čapek zurück. Der Begriff Roboter zeigt dabei starke Ähnlichkeit zu dem russischen Wort работа (rabóta), das Arbeit bedeutet. Der Begriff Roboter wurde jedoch nicht von Josef Čapek, sondern erst durch das 1921 erschienene Drama „Rossums Universal-Robots“ (R.U.R) von seinem Bruder Karel Čapek geprägt und populär gemacht. Das Wort „Automat“ erhielt etwas später durch die Bücher des 1921 geborenen polnischen Schriftstellers Stanisław Lem Einzug in den Sprachgebrauch. Auch die heutige Bezeichnung eines gesamten Wissenschaftszweiges - der Robotik - wurde durch einen Schriftsteller erstmals verwendet. Der Begriff der Robotik wurde im März 1942 von dem Science Fiction Autor Isaac Asimov in seiner Kurzgeschichte „Runaround“ eingeführt.

Nach Leonardo da Vinci folgten bis in die heutige Zeit viele weitere Entwicklungen autonomer mobiler Roboter, die von da Vincis Auto ähnelnden Fahrzeugen über fliegende und schwimmende bis hin zu krabbelnden und laufenden Maschinen reichen und heute bereits als Unterhaltungs- und Serviceroboter Einzug in unsere Haushalte erhalten haben. Nach einer Studie der International Federation of Robotics (IFR) [98] waren Ende 2006 bereits über 3,5 Millionen Serviceroboter im Einsatz und es wurde ein Anstieg auf rund 7,2 Millionen Roboter für das Jahr 2010 vorausgesagt. Neben Unterhaltungsrobotern erfreuen sich vor allem Reinigungsroboter für Böden und Fenster, sowie autonome Rasenmähdmaschinen einer steigenden Nachfrage.

Heute repräsentiert die Robotik einen zukunftssträchtigen Wissenschaftszweig, der die Ingenieurwissenschaften mit der Informatik sowie der Biologie interdisziplinär vereint und die ursprünglichen Jahrhunderte alten Visionen und Ideen der oben genannten Philosophen und Entwickler fortführt.

2.2 Autonome mobile Roboter

Es gibt keine eindeutige Definition für den Begriff des Roboters. Eine Definition, die durch die zwei weiteren Kriterien autonom und mobil spezialisiert wird, ist daher ebenso wenig eindeutig wie anerkannt. Der Verein Deutsche Ingenieure (VDI), das Robot Institute of America (RIA) und die Japan Robot Association (JARA) legen drei unterschiedliche Definitionen fest. Dabei teilt die Definition der JARA den Begriff Roboter in sechs Unterklassen auf, von denen die höheren drei Klassen den beiden Definitionen des VDI und des RIA am ähnlichsten sind.

Trotz verschiedener Definitionseinschränkungen beziehungsweise Definitionserweiterungen stimmen die drei Definitionen in folgender Grundaussage überein: „*Roboter sind stationäre oder mobile Maschinen, die mit Hilfe eines vorgegebenen Programms eine definierte Aufgabe erfüllen.*“

In dieser Definition ist bereits die Mobilität als erstes zusätzliches Kriterium erwähnt. Mobilität ist von dem lateinischen „mobilitas“ abgeleitet und wird mit *Beweglichkeit* oder *Bewegung* übersetzt. In der Robotik bedeutet der Begriff der Mobilität, dass sich ein Roboter von seinem Standort fort bewegen kann - also nicht stationär ist. Die Freiheit der Bewegung hängt dabei von der Umgebung ab. Diese kann von definierten und künst-

lich eingegrenzten Räumen bis hin zur vollkommen freien Bewegung in unbeschränkten Gebieten reichen. Die Bewegungsfreiheit wird durch das Fortbewegungsmedium und seine Eigenschaften eingegrenzt. Fortbewegungsmedien sind Wasser oder Luft. Als weiteres Medium kann das Land betrachtet werden. Das Land oder der Boden kann von völlig ebenem bis hin zu zerklüftetem, unwegsamem Gelände reichen. Abhängig von der Beschaffenheit des Bodens können Maschinen mit unterschiedlicher Fortbewegungsaktorik eingesetzt werden. Räder, Ketten und Beine repräsentieren dabei die meist eingesetzten Aktoren zur Fortbewegung.

Das zweite Kriterium ist die Autonomie. Die Autonomie, von dem griechischen Wort „autonomia“, das mit *sich selbst Gesetze gebend* oder besser *selbstständig* übersetzt werden kann, bezieht sich in der Robotik hauptsächlich auf die Unabhängigkeit einer Maschine. Diese wird sowohl auf die Maschinensteuerung als auch auf die Energieversorgung bezogen. Die Unabhängigkeit kann sich zum Beispiel auf gekapselte Teilbereiche der Steuerung, aber auch auf das gesamte Robotersystem beziehen. Streng genommen ist auch ein Roboter, der regelmäßig eine Ladestation aufsuchen muss, nicht autonom.

Durch die hier kurz angeführten Definitionsversuche der beiden Kriterien autonom und mobil sowie dem Begriff des Roboters ergibt sich die Problematik eines eindeutigen Definitionsversuchs für den Ausdruck „autonomer mobiler Roboter“.

Als autonomer mobiler Roboter kann eine Maschine bezeichnet werden, die sich in ihrer Umgebung selbstständig bewegen und mit der Umgebung interagieren kann. Ein mobiler Roboter ist im engeren Sinne dann vollständig autonom, wenn er zum Beispiel über Solarzellen seine Energieversorgung unabhängig gewährleisten kann.

In dieser Arbeit wird ein biologisch inspiriertes Steuerungskonzept vorgestellt, das eine sechsbeinige Laufmaschine sensorgeführt in ihrer Umwelt bewegt und die Maschine auf Veränderungen der Umwelt reagieren lässt. Diese Beschreibung kann am ehesten mit der Definition der Japan Robot Association (JARA) [71] für die höchste Roboterklasse, den intelligenten Roboter, verglichen werden: Ein intelligenter Roboter ist ein Gerät, das über verschiedene Sensoren verfügt und damit in der Lage ist, den Programmablauf selbsttätig den Veränderungen der Umwelt anzupassen.

Als autonom werden in dieser Arbeit Roboter bezeichnet, die unabhängig von einer stationären Energieversorgung, also ohne Kabel, durch einen Akkumulator mit Energie versorgt werden, und die ihre Steuerung, ohne eine Verbindung nach außen, auf der Maschine ausführen. Roboter werden als mobil bezeichnet, wenn sie sich im Sinne der hier beschriebenen Mobilität in einer für sie vorgesehenen Umgebung bewegen können.

Die Maschine, an der die in dieser Arbeit vorgestellten Konzepte untersucht werden, fällt nach der JARA Definition in die Klasse „Intelligenter Roboter“. Sie wird durch einen Akkumulator betrieben und ist somit autonom. Da es sich um eine Laufmaschine handelt, die sich frei bewegen kann, ist die Maschine mobil. Im Rahmen dieser Arbeit entspricht die eingesetzte Maschine nach den hier vorgestellten Kriterien einem autonomen, mobilen Roboter.

2.3 Entwicklungsprognosen

Die statistische Abteilung der IFR (International Federation of Robotics) [64] veröffentlicht regelmäßig die Studie „World Robotics“, in der weltweite statistische Daten über Industrie- und Serviceroboter präsentiert werden. Neben einem tabellarischen Ländervergleich zwischen rund 40 Ländern beinhaltet die Studie die Produktions-, Export- und Importangaben von ausgewählten Ländern für das entsprechende Jahr. Im September 2009 sind zwei Ausgaben, eine über Industrieroboter und eine über Serviceroboter, als statistischen Studien veröffentlicht worden [1]. Die Studie über Serviceroboter ist dabei in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (Fraunhofer IPA) in Stuttgart entstanden.

In dieser Studie umfasst die Kategorie Serviceroboter eine Vielzahl von Anwendungen. Diese reichen von Verteidigungs-, Rettungs- und Sicherheitsanwendungen über Transport-, Inspektions- und Logistikanwendungen bis hin zu Anwendungen im landwirtschaftlichen und medizinischen Bereich. Auch allgemeine mobile Plattformen zählen zu den Servicerobotern.

In der Studie „World Robotic 2009“ [1] wird zwischen gewerblich und privat genutzten Maschinen unterschieden. Unterscheidungsmerkmal ist hier das Produktions- und das damit verbundene Preis- und Marketingkonzept. Auf dem gewerblichen Markt werden die meisten Serviceroboter im Verteidigungs-, Rettungs- und Sicherheitsbereich sowie im landwirtschaftlichen Bereich verkauft. Auf dem privaten Markt finden hauptsächlich Roboter für den Haushalt und den Freizeit-, Unterhaltungs- und Spielzeuggebrauch Abnehmer.

Im Jahr 2008 wurden laut IFR 63.000 Servicerobotereinheiten in einem Gesamtwert von rund 11 Milliarden US \$ für Anwendungen im gewerblichen Bereich verkauft. Dabei betrug der Anteil der Verteidigungs-, Rettungs- und Sicherheitsroboter mit einer Stückzahl von rund 20.000 etwa 30% der verkauften Serviceroboter, gefolgt von Feldrobotern mit einem Anteil von 23%. Die Feldroboter machen zum größten Teil die im landwirtschaftlichen Bereich eingesetzten Melkroboter aus. Die kleineren Anteile verteilen sich über Reinigungsroboter mit 9%, medizinische Roboter und Unterwasserroboter mit je 8%, Roboter für die Bauwirtschaft mit 7% und mobile Plattformen mit 6%.

Stark anwachsende Anwendungsgebiete sind laut IRF Verteidigungs- und Rettungsszenarien, sowie Sicherheitsanwendungen im militärischen Sektor. Diese Entwicklung im militärischen Bereich basiert auf dem Ziel, die Anzahl von Menschen in militärischen Einsätzen aus Risikogründen zu minimieren. Neben den militärischen werden auch zivile Sicherheits- und Erkundungsanwendungen verstärkt auf unbemannte Flugsysteme zurückgreifen. Auch Land- und Forstwirtschaft sowie Klimaforschung zählen zu den stark anwachsenden Anwendungsgebieten für Roboter.

Anwendungsgebiete logistischer Serviceroboter reichen von Transport- über Sortieraufgaben bis hin zu Verpackung und Zustellung und werden in Bürogebäuden, in industriellen Betrieben sowie in Häfen und Flughäfen eingesetzt.

Servicerobotern im Bereich der Medizintechnik wird weiterhin ein hohes Entwicklungspotential zugeschrieben. Derzeit werden die meisten Maschinen in der minimalinvasiven Chirurgie eingesetzt.

Für den Privatgebrauch wurden rund 4,4 Millionen Robotereinheiten für Haushaltsanwendungen und 2,8 Millionen Maschinen für den Unterhaltungs- und Freizeitsektor verkauft. Für den häuslichen Gebrauch lag die Hauptabnahme bei Staubsaugroboter und Rasenmäherroboter. Die Freizeit- und Unterhaltungsroboter fassen Spielzeug- und Hobbyroboter sowie Bildungs- und Trainingsmaschinen zusammen.

Die IFR prognostiziert für den Zeitraum 2009 bis 2012 den Verkauf von weiteren 49.000 Servicerobotern im gewerblichen Sektor und etwa 11,6 Millionen Serviceeinheiten im privaten Bereich.

Für den privaten Gebrauch werden voraussichtlich im Zeitraum von 2009 bis 2012 weitere 4,8 Millionen Haushaltsroboter für Boden- und Fensterreinigung sowie den Einsatz als Rasenmäher und weitere Typen verkauft. Im Unterhaltungs- und Freizeitbereich wird mit weiteren 6,8 Millionen verkauften Robotereinheiten bis 2012 gerechnet.

Diese Prognosen machen die wachsende Beliebtheit von Robotern deutlich. Mit der Verbreitung von Robotern werden allerdings auch die Ansprüche der Nutzer und die Erwartungen an die Maschinen steigen. Je enger die Maschinen dabei mit den menschlichen Nutzern interagieren, desto höhere Ansprüche müssen an die Sicherheit der Systeme für den Nutzer gestellt werden. Zusätzlich sollten die Maschinen robust und ausfallsicher funktionieren.

In dieser Arbeit werden unter anderem die Anpassungsfähigkeit und die Robustheit einer mobilen Roboterplattform untersucht. Es soll ein Beitrag zu der Entwicklung sicherer, robuster und ausfallsicherer Steuerungskonzepte geleistet werden. Die Arbeit orientiert sich an biologischen Prinzipien und untersucht die Anpassungsfähigkeiten einer Steuerungsarchitektur für eine sechsbeinige Laufmaschine.

2.4 Anwendungsgebiete für Laufmaschinen

Laufmaschinen erweitern den Aktionsradius bisheriger rad- oder kettengetriebener Fahrzeuge auf extrem unstrukturiertes und unwegsames Gelände. In Gebieten, in denen radgetriebene Fahrzeuge an ihre Grenzen stoßen, wie zum Beispiel auf Treppen, bei großen Lücken oder unwegsamem Gelände, zeigen sich deutlich die Vorteile von Laufmaschinen. Neben der Überwindung von Hindernissen durch verschiedene Schritthöhen und der Möglichkeit, Beine zwischen Hindernissen zu positionieren, bietet auch die Möglichkeit der definierten Körperpositionierung für gezielte Operationen einen wichtigen Vorzug. Diese Vorteile machen den Einsatz von Laufmaschinen unter anderem in folgenden Einsatzgebieten interessant: Rettungsszenarien, Forstwirtschaft, Militäreinsätze, Forschung und Erkundung und auch in der Unterhaltungsindustrie.

Rettungsszenarien

In Katastrophengebieten müssen sich Rettungskräfte regelmäßig großen Gefahren aussetzen. So zum Beispiel bei der Suche nach Überlebenden in einsturzgefährdeten Bauwerken, bei dem Kontakt mit chemischen oder radioaktiven Substanzen oder bei dem Einsatz in Brand- oder Überschwemmungsszenarien. Für die Suche nach Überlebenden kann das Ri-

siko für Rettungskräfte zu hoch werden, und die Einsatzleitung muss zwischen dem Risiko für Rettungskräfte und den Überlebenschancen für die Opfer abwägen.

Die in der Regel zerstörte Infrastruktur an solchen Einsatzorten lässt den Einsatz konventioneller Fahrzeuge nicht zu. Laufmaschinen könnten hier zur Geländeinspektion, dem Umgang mit Objekten vor Ort oder für die Kartierung des Geländes eingesetzt werden. Die Hauptaufgabe soll aber in der Suche nach Überlebenden liegen, um das Einsatzrisiko für Rettungskräfte zu minimieren und die Überlebenschancen von Opfern zu erhöhen. Die Entwicklung von Robotern für die Suchen nach Überlebenden in Kombination mit einer Kartierung des Geländes wird unter anderem durch den Robocup Rescue Wettbewerb [97] vorangetrieben, der nach dem Erdbeben vom 17. Januar 1995 in Kobe, Japan, dem über 6.500 Menschen zum Opfer fielen, ins Leben gerufen wurde.

Forstwirtschaft

In der Forstwirtschaft werden für Waldarbeiten, wie das Holzfällen oder die Rodung, spezialisierte Zugmaschinen oder Kettenfahrzeuge eingesetzt. Trotz der Geländefähigkeit dieser Maschinen müssen, abhängig von der Unebenheit des Geländes, Infrastrukturen geschaffen werden, um die Mobilität der Maschinen gewährleisten zu können. Mit dem Einsatz von Laufmaschinen wären die Anforderungen an die Infrastruktur minimal. Durch Variabilität der Fußstellungen können sich Laufmaschinen auf extrem unebenem Untergrund platzieren. Darüber hinaus wird durch die einzelnen Fußaufsatzpunkte, im Gegensatz zu rad- oder kettengetriebenen Fahrzeugen, weniger Bodenfläche beschädigt. Durch die angepasste Gewichtsverlagerung und die Querkraftminimierung kann die Energieeffizienz im Vergleich zu Rad- und Kettenfahrzeugen verbessert werden [81]. Erste Prototypen für sechsbeinige Forstmaschinen sind MECANT von Halme [56] [55] und der Plustech-Harvester von John Deere [24].

Militär

Im militärischen Bereich gibt es zwei Hauptanwendungen für Laufmaschinen: Transport und Exploration. Der Hauptvorteil liegt, wie auch bei den anderen Anwendungsszenarien, in der Flexibilität und Mobilität laufender Systeme in Bezug auf die Untergrundbeschaffenheit. Da militärische Einsätze oft in sehr unstrukturierten Geländen durchgeführt werden, kann ein laufendes Transportgerät, dessen Mobilität mit der eines Menschen vergleichbar ist, die Soldaten zum einen stark entlasten und zum anderen das Gefahrenrisiko für die Soldaten verringern. Die Exploration und Inspektion zu erschließenden Geländes birgt oft ein lebensgefährliches Risiko für die Soldaten. Es wird bereits an Minensuchrobotern und Robotern zur Bombenentschärfung geforscht, die den Einsatz von Menschen und das damit verbundene Risiko minimieren sollen. Beispiele für Transportlaufmaschinen sind RHex von der McGill University in Montreal [95] [12] und BigDog von der Firma Boston Dynamics [96]. Beispiele für die Entwicklung von Laufmaschinen für die Minensuche ist das Dylema Projekt, in dem der hexapode Roboter SILO6 entwickelt wird [104], und der ISR Demining Robot von der Universität Coimbra in Portugal [79].

Erforschung und Erkundung

In der Erforschung extremer und unbekannter Umgebungen können Laufmaschinen ebenfalls durch Mobilität einen Beitrag leisten. Für die Vulkanforschung können Messungen in Regionen mit extremen Temperaturen oder hohen Gasanteilen in der Luft von Laufmaschinen durchgeführt werden, um den Forschern einen sicheren Abstand zu gewährleisten. Auf extraterrestrischen Planeten können Laufmaschinen Erkundungsmissionen mit Messungen und Aufnahme von Proben in unstrukturiertem Gelände durchführen. Ein Beispiel für die Entwicklung von Laufmaschinen für die Raumfahrt ist der achtbeinige Scorpion-Roboter, an dem die NASA in Kooperation mit der Universität Bremen arbeitet [14].

Unterhaltung und Ausbildung

Auch in der Unterhaltungsindustrie sowie der Ausbildung haben Spielzeuglaufmaschinen und Ausbildungsroboter längst Einzug gefunden und erfreuen sich einer immer größeren Beliebtheit. Von Zweibeinern bis zu Achtbeinern ist hier alles vertreten, und durch verschiedene Roboterbaukästen verschwimmen die Grenzen zwischen Amateuren und Spezialisten für laufende, gehende und krabbelnde Maschinen. Der bekannteste Spielzeugroboter ist der Roboterhund Aibo von Sony, der allerdings nicht mehr hergestellt wird [38]. Auf dem Spielzeugmarkt sind inzwischen Roboter wie der Robosapiens V3, Roboraptor und Robopet aus der WowWee Serie von Sablon [123] oder der Robonova von HiTech Robotics verbreitet. Auch Roboterbausätze, mit denen verschiedene Roboter zusammengebaut werden können, wie zum Beispiel das Bioloid Kit der Firma Robotis, finden immer mehr Verbreitung. Das Bioloid Kit wird auch für die Ausbildung eingesetzt und so verschwimmen die Grenzen zwischen Unterhaltung und Ausbildung. Gleiches gilt für LEGO® Mindstorms®. Weitere Maschinen, die sowohl für den Hobby- als auch für den Ausbildungsbereich eingesetzt werden, sind zum Beispiel die Roboterbausätze von Lynxmotion oder der Roboter Nao von der Firma Aldebaran Robotics, der 2008 als offizieller Nachfolger des Aibos von Sony als Standardplattform des RoboCups vorgestellt wurde [5].

Von den Fortschritten in der Laufmaschinenforschung profitieren verschiedene Wissenschaften, die sich mit einem breiten Spektrum von Problemstellungen auseinandersetzen. Die Forschung an Laufrobotern führt sowohl zu fächerübergreifenden als auch zu fachspezifischen Lösungen. Die Fächer und die sich überschneidenden Forschungsthemen reichen hierbei von den Ingenieurwissenschaften über die Informatik bis hin zur Biologie und machen die Laufmaschinenforschung zu einem interdisziplinären Forschungszweig.

2.5 Aktueller Stand der Forschung

Seit 40 Jahren entwickeln Wissenschaftler die unterschiedlichsten Laufmaschinen. Wenn hindernisreiches Gelände radgetriebene Maschinen an ihre Grenzen stoßen lässt, sollen Laufmaschinen zum Einsatz kommen. Vor allem sechs- und achtbeinige Laufmaschinen sind aus Ingenieurssicht interessant, da sie statisch stabiles Laufen ermöglichen. Sechs-

und achtbeinige biologische Organismen wie Insekten, Krebse und Spinnentiere meistern mühelos die verschiedensten Gelände. Trotz der allgegenwärtigen biologischen Organismen, welche die Grundprinzipien für eine Laufsteuerung in sich tragen, erhielten biologische Prinzipien erst in den 1990er Jahren Zugang zu den Ingenieurwissenschaften. Seitdem sind eine Vielzahl biologisch inspirierter Laufmaschinen entwickelt worden. Eine interessante Übersicht ist auf den Internetseiten des Leg Laboratory vom MIT zu finden [85]. Einen weiteren Überblick gibt die Internetseite über die Laufmaschinen der Technischen Universität München [93]. In den vergangenen Jahren wurden viele biologisch inspirierte sechsbeinige Roboter wie Hamlet [44] und Ajax [75] entwickelt.

Da im Rahmen dieser Arbeit Steuerungskonzepte auf einem sechsbeinigen Roboter untersucht werden, beschränkt sich die Vorstellung aktueller Forschungsroboter exemplarisch auf sechs hexapode Laufmaschinen: DLR-Crawler, LAURON, AMOS-WD06, ANTON, TARRY und Katharina. Es wird kurz beschrieben, welche Eigenschaften diese Hexapods aufweisen und welche Forschungsschwerpunkte an diesen Maschinen untersucht werden.

DLR-Crawler: Im Jahr 2008 stellte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) den DLR-Crawler vor [49] (siehe Abbildung 2.1). Die Beine des DLR-Crawlers, einer sechsbeinigen Laufmaschine, basieren auf den Fingern der DLR Hand II [54]. Der DLR-Crawler besitzt drei aktive und ein passives Gelenk pro Bein und kontrolliert 18 aktive Freiheitsgrade zur Fortbewegung. Durch die Drehmomentsensoren in jedem Gelenk und

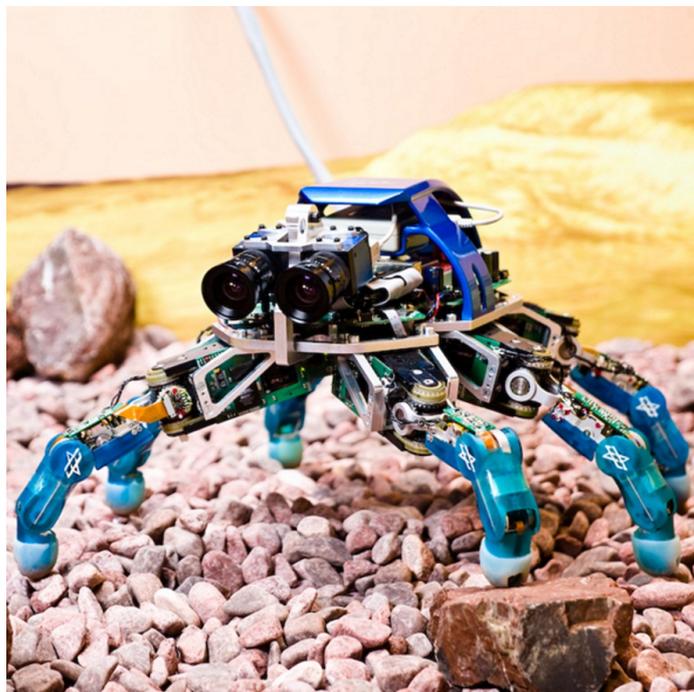


Abbildung 2.1: Der DLR-Crawler. (Mit freundlicher Genehmigung von Martin Görner)

einen Kraft- und Drehmomentsensor mit sechs Freiheitsgraden an den Fußpunkten des

Läufers kann der Crawler zur Entwicklung und Evaluation von kraftbasierten Laufmustern eingesetzt werden. Es wurde eine erste Steuerung mit aktiver Nachgiebigkeit auf dem DLR-Crawler evaluiert [50] und die Robustheit des Systems in Bezug auf Beinverluste untersucht [48]. Zusätzlich zu der Bewegungssteuerung wird der Einsatz eines stereoskopischen Kamerasystems auf dem Roboter untersucht.

LAURON: LAURON ist eine Laufmaschinenserie des Forschungszentrums Informatik (FZI) aus Karlsruhe. Das FZI forscht aktuell an der Version IVc dieses Laufroboters. Forschungsschwerpunkte sind die Einsatzmöglichkeiten von Laufmaschinen in realen Szenarien und die damit verbundenen Ansprüche an Mechanik, Technik und Steuerung [124]. Die Körpergeometrie der sechsbeinigen Laufmaschine ist an die einer Stabheuschrecke angelehnt [73]. Mit den zwei Freiheitsgraden der eingesetzten Kamera und je drei Gelenken pro Bein verfügt die Laufmaschine über insgesamt 20 Freiheitsgrade. Der sechsbeinige Läufer ist mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet und eine technisch und mechanisch weit entwickelte Maschine. Auch die Bewegungssteuerung ist teilweise durch biologische Arbeiten an der Stabheuschrecke inspiriert und basiert auf einer Kontrollarchitektur, die eine klassische Maschinensteuerung mit einer verhaltensbasierten Steuerung kombiniert [4, 73].



Abbildung 2.2: Der Laufroboter Lauron IVc © FZI Forschungszentrum Informatik

AMOS-WD06: Das Bernstein Center for Computational Neuroscience (BCCN) in Göttingen forscht unter anderem an der sechsbeinigen Laufmaschine AMOS-WD06 (siehe Abbildung 2.3). An dieser Robotertestplattform werden künstliche neuronale Steuerungen zur Koordination vieler Freiheitsgrade erforscht [116]. Der Aufbau der Laufmaschine orientiert sich an dem Körper der Schabe. Neben den sechs identischen Beinen mit je drei Gelenken besteht der Körper aus zwei Segmenten, die durch ein aktives Gelenk verbunden sind. Die Vorderbeine befinden sich an dem vorderen Segment und die Mittel- und Hinterbeine an dem hinteren Segment. Forschungsgegenstand ist eine modulare künstliche neuronale Steuerung, die unterschiedliche künstliche neuronale Netze vereint. Zum

Beispiel agiert ein künstlicher neuronaler Oszillator als zentraler Mustergenerator zur Erzeugung der rhythmischen Beinbewegung. Außerdem generiert ein künstliches neuronales Netz die verschiedenen Schrittmuster der Laufmaschine [83]. Mit AMOS-WD06 konnte gezeigt werden, dass mit einfachen neuronalen Netzen und wenigen künstlichen Neuronen ein insektenähnliches Verhalten auf einem Roboter umgesetzt werden kann [84].

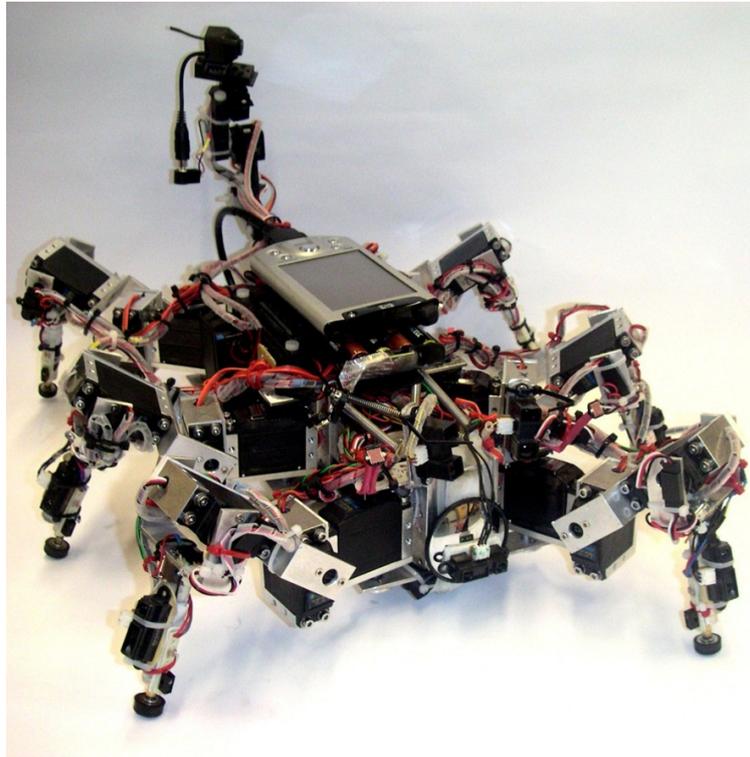


Abbildung 2.3: Der Roboter AMOS-WD06. (Mit freundlicher Genehmigung von Poramate Manoonpong)

ANTON: Die sechsbeinige Laufmaschine ANTON wurde vom Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) in Kooperation mit der Otto von Guericke Universität in Magdeburg entwickelt [76]. ANTON baut auf einer siebenjährigen Entwicklung verschiedener Laufmaschinen auf. Seine Vorgänger sind als SLAIR und SLAIR2 bekannt [32, 90]. Zusätzlich zu den 18 Freiheitsgraden der sechs Beine ist der Körper dieser Laufmaschinenserie mit je zwei weiteren Freiheitsgraden zwischen den einzelnen Körpersegmenten ausgestattet. ANTON ist aus drei modularen Körpersegmenten aufgebaut und kann um zusätzliche Segmente erweitert werden. Jedes Körpersegment ist auf der rechten und linken Seite mit je einem Bein ausgestattet und kann an der Vorder- und Hinterseite mit anderen Körpersegmenten verbunden werden. Der Aufbau der Beine orientiert sich am Insektenbein und verfügt über drei Freiheitsgrade. Durch die zusätzlichen Freiheitsgrade zwischen den Körpersegmenten ist ANTON sehr viel beweglicher als seine sechsbeinigen Roboter-Artgenossen. Gesteuert wird der Roboter mit einem hierarchisch organisierten,

modularen Steuerungssystem. ANTON dient den beiden Entwicklungsinstituten als Plattform zur Untersuchung von intelligenten und adaptiven Bewegungssteuerungen und auch der Anpassung und Optimierung der mechanischen und elektronischen Bauteile für den Einsatz in mehrbeinigen Laufmaschinen.



Abbildung 2.4: Die Laufmaschine ANTON © 2007 RobotsLab.

TARRY: Die Laufmaschine Tarry [2] ist an der Universität Duisburg in Kooperation mit der Universität Bielefeld entwickelt worden. Der Aufbau der Laufmaschine orientiert sich sehr stark an dem Körper einer Stabheuschrecke. Die sechs Beine sind mit drei Gelenken ausgestattet und in Anlehnung an das Insektenvorbild mit den entsprechenden Winkeln am Hauptkörper montiert. Die Dimensionen der einzelnen Segmente und die Gelenkpositionen und Orientierungen entsprechen denen des biologischen Vorbildes. Mit drei Gelenken pro Bein verfügt die Maschine über 18 Freiheitsgrade. Mit einer Federkonstruktion an den Gelenken von Tarry IIb wurden diese um eine passive Elastizitätskomponente erweitert [114]. Der Roboter wurde mit aktiven taktilen Antennen als neuartige Sensoren ausgestattet.

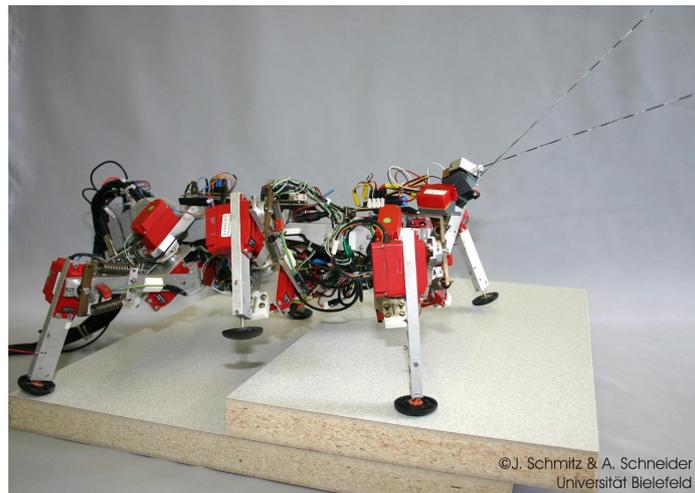


Abbildung 2.5: Die Laufmaschine Tarry IIb. (Mit freundlicher Genehmigung von Josef Schmitz)

Forschungsschwerpunkte dieser Laufmaschine liegen in der Evaluierung und Verifizierung von Thesen aus der biologischen Kybernetik. Ein insektenähnliches Verhalten der Roboterplattform untermauert die aufgestellten Erklärungsansätze zur Laufsteuerung [109] oder der Funktionsweise von Antennen [77] bei Insekten. Die Ergebnisse der biologischen Forschung gehen direkt in den Erkenntnisgewinn der Robotik ein.

Die Weiterentwicklung von Laufrobotern vereint verschiedene Forschungsgebiete: vom Aufbau eines Laufroboters und den mechanischen Eigenheiten über Einsatz, Kombination und Entwicklung von Sensoren zur Wahrnehmung bis hin zu dem Entwurf und der Analyse der Steuerungssoftware. Das gemeinsame Fernziel der hier exemplarisch vorgestellten und noch vieler weiterer Arbeiten liegt in der Entwicklung eines autonomen, mobilen Laufroboters für den Einsatz in natürlichem, unstrukturiertem Gelände. Die hier aufgeführten Arbeiten überschneiden sich in allgemeinen und grundlegenden Bereichen, heben sich aber in den einzelnen Schwerpunkten Mechanik, Sensorik und Steuerung voneinander ab.

Mechanik und Sensoren:

In der Entwicklung von Mechanik, teils eigenen Sensoren und in der Entwicklung des Aufbaus von Laufrobotern heben sich die Maschinen Anton und Lauron deutlich von den Robotern AMOS-WD06 und Tarry IIb ab. Während an den Robotern ANTON und Lauron die spezialisierte Mechanik und Elektronik untersucht, angepasst und optimiert wird, ist der Roboter AMOS-WD06 eine reine Testplattform und hauptsächlich aus Standard-Modellbauteilen aufgebaut. Die Laufmaschine Tarry IIb besteht ebenfalls zum größten Teil aus Standard-Modellbauteilen. Eine Optimierung von Material und eingesetzter Mechanik ist im Gegensatz zu den Projekten Anton und Lauron kein Forschungsgegenstand. Allerdings wird für Tarry IIb der Einsatz biologisch inspirierter Fühler als alternative Sensoren untersucht.

Der DLR-Crawler nimmt hier eine gesonderte Rolle ein. Die Mechanik und Sensorik des DLR-Crawlers ist ursprünglich für die DLR-Hand entwickelt worden. Die empfindliche Sensorik und die ausgefeilte Mechanik der Finger der DLR-Hand werden im DLR-Crawler für die Beine des Roboters eingesetzt. Diese Maschine und das Forschungsprojekt profitieren von der Entwicklung und den Forschungsarbeiten an Mechanik und Elektronik für die DLR-Hand.

Steuerung:

Die Steuerungskonzepte der Maschinen Tarry IIb und AMOS-WD06 orientieren sich stark an den biologischen Vorbildern der Stabheuschrecke und der Schabe. Beide Steuerungen nutzen ein reaktives, dezentrales Konzept unter dem Einsatz künstlicher neuronaler Netze. Sie übertragen die Erkenntnisse experimenteller Ergebnisse aus der Biologie auf die Robotersteuerung. Die Roboter dienen sowohl als Evaluationsplattform für die Untersuchung von Theorien aus der Biologie als auch der Weiterentwicklung von Laufmaschinen.

Die Steuerung des DLR-Crawlers baut auf der Steuerung von Tarry IIb auf und nutzt zur eigenen Optimierung die zur Verfügung stehenden, empfindlichen Sensoren. Zusätzlich wird an dieser Maschine die Kombination aus Orientierung und Kartierung des Geländes mittels stereoskopischer Kameras und der Steuerung der Laufbewegung untersucht. Die aktuellsten Arbeiten analysieren weiterhin die Robustheit der Steuerungssoftware in Bezug auf Ausfälle im Bewegungsapparat.

Die Roboter Anton und Lauron unterscheiden sich in der Steuerung von den hier aufgeführten Maschinen durch den Einsatz einer hierarchischen Kontrollstruktur, welche Vorteile aus der klassischen und der verhaltensbasierten Steuerungstheorie vereint. Aktueller Schwerpunkt der Forschung in Bezug auf die Steuerung liegt in der Auswertung verschiedener Sensorsignale für die Bewältigung realer Einsatzszenarien, wie zum Beispiel Rettungseinsätze oder Inspektionseinsätze. Bildverarbeitung, Missionsplanung und Kartierung werden hier in Kombination mit der Bewegungssteuerung der sechsbeinigen mobilen Plattform untersucht.

Es können noch viele weitere sechsbeinige Roboter genannt werden, wie die frühen, sechs-

beinigen Laufroboter Hannibal und Attila vom Massachusetts Institute of Technology aus den 1990er Jahren, an denen grundlegende Untersuchungen durchgeführt wurden [40, 41, 42]. Auch die Ergebnisse der Arbeiten an der hexapoden Maschine Katharina [63], an der bis 2002 geforscht wurde, stellen wichtige Beiträge für die Fortbewegung mit sechs Beinen dar. Diese älteren Arbeiten zeigen zusammen mit den aktuellen Forschungen deutlich die heutigen Möglichkeiten und Grenzen von sechsbeinigen Robotern auf.

Die Laufmustererzeugung sowie der Einsatz von elementaren Beinreflexen als Reaktion auf eine Hindernisdetektion sind Stand der Technik. Laufen in Kombination mit Ausweich- oder Zielsuchverhalten können umgesetzt werden. Auch die Anpassung der Schrittmuster an die Untergrundbeschaffenheit ist in vielen Maschinen integriert. Die grundlegenden Bewegungssteuerungen werden inzwischen häufig mit kamerabasierter Orientierung kombiniert. In den letzten Jahren hat die kraftbasierte Nachgiebigkeit in den Beingelenken an Bedeutung gewonnen und wird inzwischen in der Bewegungssteuerung genutzt.

Trotz großer Fortschritte auf dem Gebiet der Laufroboter zeigt der Vergleich mit Insekten als biologische Vorbilder für das sechsbeinige Laufen dass an heutigen Laufrobotern und den Aspekten ihrer Mobilität sowie ihrer Adaptivität weitere Forschungsarbeiten nötig sind. Aufgrund der Komplexität eines biologischen Läufers in Bezug auf Bewegungsapparat, Zusammenspiel der Sinnesorgane und der Steuerung des Laufverhaltens gibt es zahlreiche Teilgebiete, die weiter untersucht werden müssen.

Im Folgenden werden einzelne von den zahllosen Teilgebieten, auf denen weitere Untersuchungen nötig sind, exemplarisch genannt. Biologische Organismen nutzen neben der Wahrnehmung der Außenwelt auch die Eigenwahrnehmung zur Kontrolle ihrer Bewegungen. Diese, auch Propriozeption genannte Eigenwahrnehmung, kann in Kombination mit der Außenwahrnehmung einen Beitrag zu der Zuverlässigkeit der Bewegungssteuerung leisten. Des Weiteren können der Einsatz von Reflexen und die Analyse ihres Zusammenspiels die Robustheit der Bewegungssteuerung erhöhen. Darüber hinaus kann auch die Untersuchung starker Störungen des Bewegungsapparats Aufschlüsse über die Kontrolle von Bewegung und Stabilität liefern.

In dieser Arbeit werden biologisch inspirierte Steuerungskonzepte auf einer sechsbeinigen Laufmaschine mit 18 Freiheitsgraden untersucht. Die eingesetzten Steuerungskonzepte knüpfen an die Arbeiten an der Laufmaschine Tarry IIb an und untersuchen neben dem adaptiven Laufen in unebenem Gelände auch die Robustheit der Steuerung. Mechanische und elektronische Weiterentwicklungen werden in dieser Arbeit nicht behandelt. Die Steuerung greift fast ausschließlich auf die Auswertung des Stromverbrauchs in den einzelnen Gelenken zurück.

Überschneidungen zu anderen Arbeiten liegen allgemein in dem Einsatz von Reflexen, in der Untersuchung von Nachgiebigkeit in den Beingelenken und teilweise in der Untersuchung von Störungen des Laufverhaltens.

Erweiterungen zu dem aktuellen Stand der Forschung und ein wissenschaftlicher Beitrag dieser Arbeit umfassen allgemein die Untersuchung alternativer Refleximplementierungen. Jede der vorgestellten Maschinen nutzt für die Bodendetektion Taster oder Kraftsensoren

in den Beinen. In dieser Arbeit wird alternativ zu diesen Sensoren die Auswertung der Gelenkbelastung als propriozeptives Signal untersucht, aus der sich ebenfalls die Bodendetektion erkennen lässt. Durch eine übertragbare, alternative, zuverlässige Bodendetektion kann die Robustheit von Laufmaschinen zum Beispiel bei Sensorausfällen gesteigert werden.

Zusätzlich untersucht diese Arbeit den Entwurf und die Umsetzung eines emergenten, reaktiven Laufens und zeigt, dass Laufen als emergente, reflexbasierte Reaktion auf eine externe Kraft zu adaptiven Schrittmustern führen kann und sowohl den Rechenaufwand für die Bewegung einzelner Gelenke als auch die wirkenden Scherkräfte und somit den Energieverbrauch der Maschine reduzieren kann.

Darüber hinaus wird die Robustheit der implementierten Steuerung exemplarisch für Beinamputationen bewertet, und die Effekte auf die Stabilität des Roboters werden ermittelt. Es werden mögliche, dezentral ausgelöste Reaktionen zur Kompensation der amputationsbedingten Mobilitätseinschränkung vorgestellt und analysiert.

Kapitel 3

Biologisch inspirierte Steuerungsprinzipien

Inhalt

3.1	WALKNET - ein Ansatz der biologischen Kybernetik	23
3.2	Das Software-Framework MCA2	26
3.3	ORCA	28
3.3.1	Organic Computing	28
3.3.2	Die Kontrollarchitektur	30

Vor allem das Laufen in seinen verschiedenen Erscheinungsformen ist eine faszinierende Entwicklung der Natur, die mit den heutigen technischen Möglichkeiten nur ansatzweise nachgebildet werden kann. Jede Art des Laufens ist an die verschiedensten Umgebungen angepasst. Diese reichen von trockenen, sandigen Steppen und zerklüfteten, felsigen „Mondlandschaften“ über Wiesen, Wälder und feuchte Moorlandschaften bis hin zu vereisten Untergründen. Trotz des so vielseitigen und teils extrem unebenen Untergrunds ist die biologisch terrestrische Lokomotion in alle Bereiche des Planeten vorgedrungen. Die flexible Anpassung des Lokomotionsapparates an den Untergrund während des Laufens ist vielleicht das biologische Konzept, welches am offensichtlichsten den heutigen technischen Konzepten zur terrestrischen Fortbewegung überlegen ist.

Mit der Erfindung des Rades sind diverse Transportsysteme entwickelt und optimiert worden. Es besteht kein Zweifel, dass radgetriebene Fahrzeuge in Bezug auf Geschwindigkeiten und den Transport hoher Nutzlasten jedem beinbasierten System überlegen sind. Doch der Preis für Geschwindigkeit und den Transport großer Massen sind künstliche, gut vernetzte Umwelten. Infrastrukturen wie Straßen- oder Schienennetze werden vorausgesetzt und beschränken den Aktionsradius radgetriebener Fahrzeuge. Bei gegebener Infrastruktur basiert die radgetriebene Lokomotion auf dem einfachen Prinzip der endlosen Rotation eines Rades um eine Achse.

Eine Laufmaschine vereint verschiedene Grundprinzipien und Untersysteme zur Fortbewegung. Ein Bein besteht aus Segmenten verschiedener Längen und unterschiedlichen Gelenken, deren Zusammenspiel, basierend auf Hebelgesetzen, durch Muskeln und Sensoren an die Umwelt angepasst ist. Die Natur hat keine extremen Infrastrukturen geschaffen, die von der Fortbewegung mit Beinen vorausgesetzt werden. Das biologische Laufen in unebenem Gelände verlangt eine ständige Wahrnehmung der Umgebung und stellt somit hohe Ansprüche an den sich fortbewegenden Organismus. Es erfordert eine kontinuierliche

Interaktion mit der Umwelt. Die stetige Konfrontation eines laufenden Organismus mit unbekannter, unstrukturierter Untergrundbeschaffenheit und allgegenwärtigen Hindernissen fordert die gezielte Bewegungsanpassung an die gegebene Situation. Somit setzt das biologische Laufen eine einfache Intelligenz voraus.

Technisches Laufen mit Laufmaschinen hat seit etwa 25 Jahren wieder Interesse und Begeisterung in den Ingenieurwissenschaften geweckt. Neben der mechanischen Entwicklung spielen die Kontrollstrukturen für die Bewegungen des Laufens eine immer größere Rolle. Diese Kontrollstrukturen setzen eine Grundintelligenz der Laufmaschinen voraus. Diese Intelligenz ermöglicht die flexible Anpassung an schwer zugängliches Gelände. Laufende Maschinen können den Einsatz terrestrischer Fortbewegung auf gefährliches, unstrukturiertes Gelände erweitern. Die Kontrollprinzipien hat die Natur bereits entwickelt und im Laufe von Jahrtausenden optimiert. Die Lösungen, welche die Natur für das Problem des angepassten, intelligenten Laufens bereits anbietet, erfreuen sich eines wachsenden Interesses der Ingenieure. Die Entwicklung von Laufmaschinen trägt zu einer starken Interdisziplinarität zwischen Ingenieurwissenschaften und verschiedenen Fachgebieten der Biologie bei. Biologisch inspirierte Technik wird zunehmend moderner und populärer. Das heißt nicht, dass Ingenieure bald ausschließlich die Natur nachbauen und kopieren anstatt selber zu entwickeln. Ganz im Gegenteil, die Natur greift auf Materialien und Energielieferanten zurück, die Ingenieure nicht haben. Herausforderung der Ingenieurwissenschaften bleibt es, nützliche, natürliche Konzepte und Prinzipien zu verstehen, sie zu abstrahieren und sie mit den zur Verfügung stehenden Technologien analog zum biologischen Vorbild umzusetzen. Die Ingenieurwissenschaften entwickeln weiterhin technische Systeme, deren Grundprinzipien aus der Natur stammen können, deren Aufbau und Leistungsfähigkeit aber nicht nach biologischen, sondern nach technischen Maßstäben beurteilt werden.

Neben den mechanischen und technischen Entwicklungen kommt den Steuerungskonzepten für das Laufen eine immer wichtigere Bedeutung zu. Die Fortbewegung durch Laufen basiert auf einer zyklischen Bewegung mehrsegmentiger Gliedmaßen. Die Anzahl dieser Gliedmaßen variiert bei den verschiedenen biologischen Organismen von etwa 350 bei Tausendfüßlern, über mehrere zehn bei Hundertfüßern, acht und sechs Gliedmaßen zur Fortbewegung bei weiteren Arthropoden und vier und zwei mehrsegmentige Gliedmaßen bei Wirbeltieren. Die Gliedmaßen entsprechen beim Laufen in der Regel Beinen und führen eine zyklische Bewegung aus. Ein Bein wechselt zwischen einer Stemmphase, in der es den Körper trägt und ihn in Laufrichtung stemmt, und einer Schwingphase, in der es nach vorne schwingt. Die verschiedenen Beine müssen zusätzlich koordiniert werden. Durch das koordinierte Stemmen und Schwingen aller Beine entsteht ein Laufmuster. Die Laufmustergenerierung, basierend auf der Beincoordination und dem Stemm-Schwing-Rhythmus, ist Aufgabe der Laufsteuerung und kann nach verschiedenen Prinzipien umgesetzt werden.

In diesem Kapitel werden unterschiedliche, verschieden stark biologisch inspirierte Steuerungsprinzipien vorgestellt. Nach einer kurzen Beschreibung des Walknets, einem Konzept aus der biologischen Kybernetik, wird das in einem Technikinstitut entstandene Steuerungskonzept „MCA2“ dargestellt. Zum Abschluss dieses Kapitels wird das DFG Schwerpunktprogramm „Organic Computing“ und die in dieser Arbeit verwendete Kontrollarchitektur „ORCA“ zur Steuerung der Roboterplattform vorgestellt.

3.1 WALKNET - ein Ansatz der biologischen Kybernetik

Das „Walknet“ ist eine Software zur Steuerung eines sechsbeinigen Laufverhaltens, basierend auf künstlichen neuronalen Netzen. Es wurde in der Abteilung für biologische Kybernetik an der Universität Bielefeld entwickelt und dient unter anderem der Evaluation biologischer Hypothesen über die Laufsteuerung von Insekten. Das „Walknet“ baut auf Ergebnissen biologischer Verhaltensexperimente und Untersuchungen neuronaler Zusammenhänge des Insektennervensystems auf [22].

Das „Walknet“ wurde hauptsächlich zur Steuerung einer Heuschreckensimulation eingesetzt. Die Heuschreckensimulation besitzt sechs Beine mit je drei Gelenken. Die Gelenke werden in jedem Bein vom Körper ausgehend mit α , β und γ bezeichnet.

Das „Walknet“ ist eine dezentrale Steuerung, die aus verschiedenen Modulen aufgebaut ist. Jedes Bein der simulierten Stabheuschrecke wird von einer eigenen Beinsteuerung kontrolliert. Abbildung 3.1 zeigt die schematische Darstellung einer Beinsteuerung. Jede dieser Steuerungen setzt sich ebenfalls aus einzelnen Modulen zusammen. Jedes Modul wird durch ein künstliches neuronales Netz umgesetzt. Neben den drei Hauptnetzen der Beinsteuerung, dem Selektionsnetz, dem Schwingnetz und dem Stemmnetz, besteht es zusätzlich aus einem Zielnetz, einem Höhennetz, einer Angabe der aktuellen Position „PEP“ (Posteriore Extrem Position) und den von Cruse vorgestellten Koordinationsregeln [20].

Selektionsnetz Das Selektionsnetz wirkt hemmend oder erregend auf das Schwing- und das Stemmnetz und wählt somit aus, ob das Bein eine Schwing- oder eine Stembewegung ausführt. Das Selektionsnetz ist als rekurrentes künstliches neuronales Netz umgesetzt. Es besitzt die beiden Eingaben „Bodenkontakt“ und „Beinposition“ und die beiden Ausgaben „Schwingen“ und „Stemmen“. Auf die beiden Ausgabeneinheiten wird entweder erregend oder hemmend gewirkt. Eine explizite gegenseitige Unterdrückung der beiden Ausgaben durch das Selektionsnetz findet nicht statt. In [16] wurde festgestellt, dass sich durch die stabilisierende Selbsterregung sowohl des Schwing- als auch des Stemmnetzes das Selektionsnetz ohne eine „Entscheiderfunktion“ robuster verhält. Das Selektionsnetz funktioniert demnach nicht als Schalter, sondern beeinflusst durch Verstärkung oder Abschwächung das Schwing- und das Stemmnetz. Die Eingabe des Bodenkontakts ist an einen Sensor angeschlossen. Die Eingabe der Beinpositionseingabe wird sowohl durch die Position aus dem PEP-Netz als auch durch verschiedene Koordinationsregeln beeinflusst. Die Koordinationsregeln und ihre Wirkungsrichtungen sind in Abbildung 3.2 aufgelistet und dargestellt.

Schwingnetz Das Schwingnetz ist verantwortlich für die Durchführung der Schwingphase des Beins. Es ist ein bereits trainiertes, zweilagiges, vorwärtsgerichtetes, künstliches neuronales Netz mit sieben Eingabeneuronen und drei Ausgabeneuronen. Unter den sieben Eingabeneuronen repräsentieren drei Neuronen die aktuelle Winkelstellung der Gelenke α , β und γ , drei Neuronen repräsentieren die Zielwinkelstellung der drei Gelenke. Ein zusätzliches Neuron dient zur Modellierung einer Ruhephase. Die Zielwinkelstellung wird vom Zielnetz bestimmt und dem Schwingnetz übergeben. Die drei Ausgabeneuronen entspre-

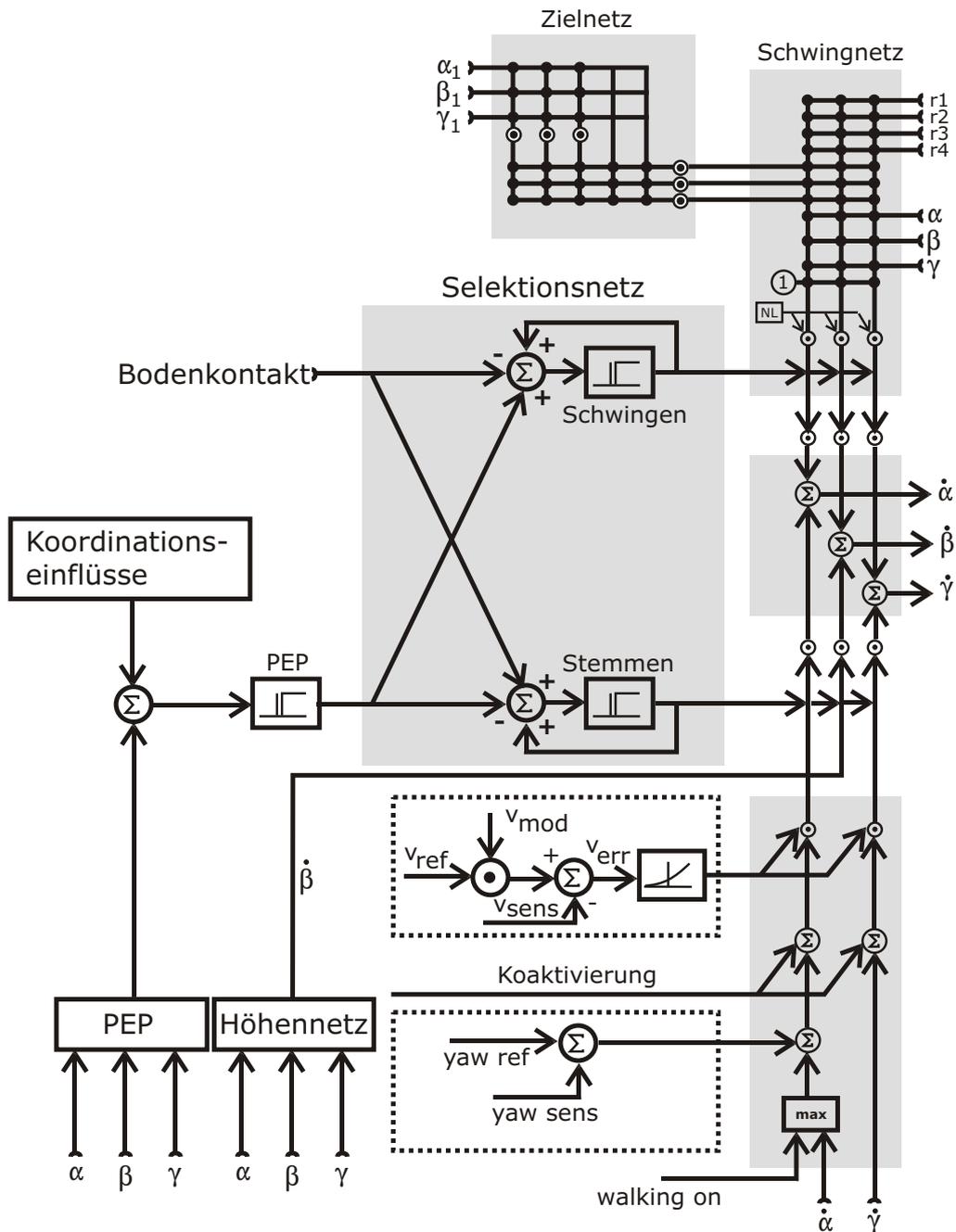
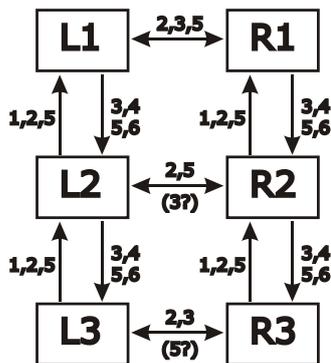


Abbildung 3.1: Aufbau einer Beinsteuerung des Walknets mit einzelnen Modulen: ein Schwing- und ein Stemmnetz zur Steuerung der Schwing- und Stembewegung, ein Zielnetz zur Bestimmung der nächsten Zielposition, ein Selektionsnetz zur Auswahl zwischen Schwing- und Stembewegung, ein Höhennetz zur Regulierung des Körperabstandes vom Untergrund und den Koordinationseinflüssen. α , β und γ sind die Gelenkwinkel. $\dot{\alpha}$, $\dot{\beta}$ und $\dot{\gamma}$ sind die Winkelgeschwindigkeiten für die entsprechenden Beinsegmente.

chen den resultierenden Winkelgeschwindigkeiten für jedes Gelenk $\dot{\alpha}$, $\dot{\beta}$ und $\dot{\gamma}$. Das hier in Abbildung 3.1 gezeigte Schwingnetz (oben rechts) wurde um vier weitere Eingabeneuronen ergänzt, die die Schwingphase des Beins um einen Hebereflex erweitern. Jedes der vier Neuronen, r_1 , r_2 , r_3 und r_4 , ist mit einem physikalischen Sensor am Bein zur Kontaktdetektion verbunden.



Koordinationsregeln:

1. Unterdrückt Schwingphase zur statischen Stabilität
2. Erregt Schwingphase zur zeitlichen Synchronisation
3. Verzögert Schwingphase zur zeitlichen Synchronisation
4. Position beeinflusst Zielposition am Ende der Schwingphase
5. Aktiviert Nachbarbeine zur gleichmäßigen Kraftverteilung
6. Löst Korrekturschritt aus

Abbildung 3.2: Sechs Beinsteuerungen für die drei linken (L1, L2, L3) und die drei rechten Beine (R1, R2, R3) mit den unterschiedlichen Einflüssen der Koordinationsregeln. Die Pfeile zwischen einzelnen Beinen geben die Richtung an, in der die Regel wirkt. Ein „?“ an einem Pfeil gibt an, dass die neuronalen Zusammenhänge hier noch nicht im Detail geklärt sind. Jede Beinsteuerung entspricht dem in Abbildung 3.1 skizzierten Aufbau.

Stemmnetz Das Stemmnetz ist für die Durchführung der Stemmphase verantwortlich und steuert die stemmenden Beine, die mit dem Untergrund in Kontakt stehen und das simulierte Insekt tragen. Dabei werden die Winkelgeschwindigkeiten $\dot{\alpha}$ und $\dot{\gamma}$ vom Stemmnetz gesteuert. Das β -Gelenk wird durch ein separates Höhennetz gesteuert, da das β -Gelenk die Körperhöhe des Insekts beziehungsweise den Körperabstand zum Untergrund reguliert.

Das α - und das γ -Gelenk unterliegen einer positiven bandpassgefilterten Rückkopplung. Das bedeutet, dass die aktuellen Winkelgeschwindigkeiten von $\dot{\alpha}$ und $\dot{\gamma}$ dem Stemmnetz als Eingaben dienen und jede passive Bewegung der Gelenke in eine aktive Bewegung umgewandelt wird. Zur Stabilisierung der positiven Rückkopplung wird diese bandpassgefiltert. Die Eingabe des α -Gelenks wird mit einem schwachen positiven Schwellwert (walking on) verglichen, der die aktuelle Bewegungsrichtung repräsentiert. Der größere Wert aus dem Vergleich wird als Eingabe in das Stemmnetz übernommen. Zusätzlich zu den beiden Winkelgeschwindigkeiten fließen die Drehung des Körpers um die vertikale Achse und die Laufgeschwindigkeit des Insekts sowie die Koordinationsregel der Koaktivierung in das Stemmnetz mit ein.

Koordinationsregeln Abbildung 3.2 zeigt die sechs von Cruse vorgestellten [20] Koordinationsregeln. Jedes Bein ist durch einen Kasten repräsentiert, der dem Aufbau des

Walknets aus Abbildung 3.1 entspricht. Die Pfeile zwischen den Kästen geben an, in welche Richtung die Regeln wirken. Regeln, die mit einem „Fragezeichen“ markiert sind, werden vermutet, sind aber noch nicht im Detail erforscht. Die sechs Koordinationsregeln sind von Eins bis Sechs durchnummeriert und werden wie folgt definiert:

1. Die Stemmphase eines Beines unterdrückt den Beginn der Stemmphase des anterioren Nachbarbeins
2. Der Beginn einer Stemmphase regt das anteriore Nachbarbein zum Schwingen an
3. Die Verzögerung der Stemmphase regt den Start der Schwingphase im posterioren Nachbarbein an
4. Die Position des Fußes, des Tarsus, bestimmt die Zielposition der Schwingphase des posterioren Nachbarbeins
5. Belastungserhöhung eines Beins erhöht die ausgeübte Kraft des Beins und verlängert die Stemmphase
6. Tritt ein Bein auf das anteriore benachbarte Bein, wird ein Korrekturschritt ausgelöst [108]

Die Eigenschaften des Walknets und die Möglichkeiten der Erweiterung wurden in zahlreichen Simulationen untersucht und evaluiert [21, 30, 74]. Im Jahr 2008 wurde die Funktionalität des Walknets erstmals auf der realen Roboterplattform Tarry mit Erfolg implementiert und evaluiert [109].

3.2 Das Software-Framework MCA2

Die „Modular Controller Architecture 2“ (MCA2) ist ein Softwareframework des Forschungszentrums Informatik der Universität Karlsruhe [115, 119]. Das Framework basiert auf der Programmiersprache C++ in Kombination mit einer Echtzeiterweiterung, Real Time Application Interface (RTAI/LXRT) [60], und setzt sich aus einfachen Modulen mit standardisierten Schnittstellen zusammen. Jedes Modul besitzt fünf Kommunikationsschnittstellen: eine Sensoreingabe, eine Sensorausgabe, eine Steuerungseingabe und eine Steuerungsausgabe sowie eine Schnittstelle zur Modifikation der modulinternen Parameter. Neben den internen Parametern und Variablen besitzt ein Modul zwei Routinen: eine Sense-Routine und eine Control-Routine. Die Routinen sind jeweils für die Verarbeitung der eingehenden Sensor- und Steuerungsdaten verantwortlich.

Die Module können in Gruppen zusammengefasst werden. Eine Gruppe von Modulen verhält sich nach außen hin wie ein Modul mit einer komplexen Funktionalität, wobei die internen Module hierarchisch organisiert werden. Die internen hierarchisch organisierten Module werden Ebene für Ebene iterativ ausgeführt. Dabei werden die Sense-Routinen von der untersten zur obersten Ebene durchlaufen und die Control-Routinen von der obersten

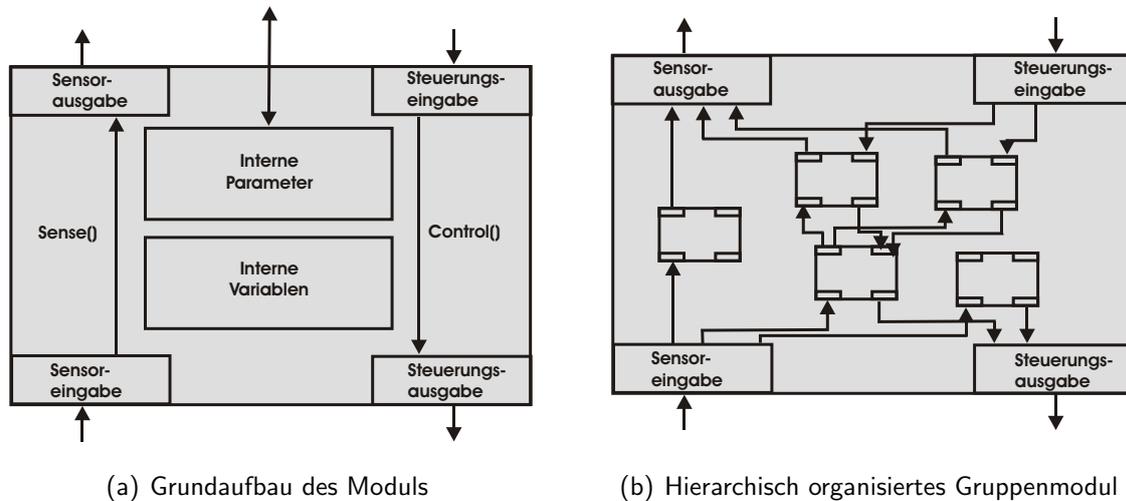


Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau eines MCA2-Moduls unter a) mit Sensoreingaben und -ausgaben, Steuerungseingaben und -ausgaben und den internen Parametern und Variablen und unter b) die Skizzierung einer Gruppe von Modulen, zusammengefasst in einem Gruppenmodul

zur untersten Ebene. In Abbildung 3.3(a) ist der Aufbau eines Moduls schematisch dargestellt und Abbildung 3.3(b) zeigt eine Gruppe von Modulen, zusammengefasst in einem Gruppenmodul.

Die verbindenden Kanten zwischen den Modulen kopieren lediglich die an den Schnittstellen anliegenden Werte. Diese Werte stehen als Arrays von Fließkommazahlen an den Schnittstellen zur Verfügung. Vor einem Kopiervorgang wird überprüft, ob sich die Werte verändert haben. Im Falle eines gleichgebliebenen Wertes wird dieser nicht kopiert. Neben den Fließkommazahlen können auch komplexe Datenstrukturen in sogenannten „Blackboards“ gespeichert werden. Blackboards sind für das Netzwerk transparente Speicherbereiche, die als Arrays organisiert sind. Für diese Speicherbereiche werden verschiedene Zugriffsmethoden unterstützt. Neben dem „MCA-Browser“, der eine Übersicht über die verwendeten Module gibt, verfügt das Framework auch über eine graphische Benutzerschnittstelle.

Biologisch inspirierte Roboter, die das MCA2-Framework zur Steuerung nutzen, sind das Schreitfahrwerk ALDURO, ein Hybrid zwischen Fahrzeug und vierbeiniger Gehmaschine der Universität Duisburg-Essen [45, 92] und der mehrsegmentige Kanalreinigungsroboter MAKRO vom Fraunhofer Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme (AIS) in Sankt Augustin [3, 99].

Das Walknet ist ein dezentrales, rein reaktives Konzept für die Bewegungssteuerung eines sechsbeinigen Läufers. Es basiert auf Ergebnissen aus der Biologie und wurde bereits in den 1990er Jahren mit weiteren Steuerungskonzepten verglichen [42]. Obwohl das reaktive Steuerungskonzept in diesem Vergleich teilweise schlechter als seine Konkurrenten, ein

zentraler Mustergenerator und ein hybrider Ansatz aus reaktivem Konzept und zentralem Mustergenerator, Abschnitt, zeigte es immer wieder Vorzüge in seiner Adaptivität. Auch die Steuerungen der unter 2.5 vorgestellten Roboter DLR-Crawler und AMOS-WD06 sind an das Walknet angelehnt.

Auch diese Arbeit knüpft an das Walknetkonzept an und setzte dieses mit einer modularen Kontrollarchitektur um, die sich stark an dem MCA-2 Softwareframework orientiert. Im folgenden Abschnitt wird diese Architektur genauer beschrieben.

3.3 ORCA

Die „Organic Robot Control Architecture“ (ORCA) ist eine dezentrale, modulare und auf Organic Computing Prinzipien basierende Steuerungsarchitektur für Robotersysteme. ORCA ist ein Projekt des Instituts für Technische Informatik der Universität zu Lübeck gemeinsam mit dem Institut für Informatik der Universität Osnabrück und dem Fraunhofer Institut für Autonome Intelligente Systeme (AIS) im Rahmen des Schwerpunktprogramms Organic Computing der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) [7, 65, 87, 88]. Diese Arbeit ist im Rahmen des ORCA-Projekts entstanden und untersucht die Anwendbarkeit dieser Kontrollarchitektur auf Laufmaschinen. Im Folgenden werden das Schwerpunktprogramm Organic Computing und anschließend die Kontrollarchitektur vorgestellt.

3.3.1 Organic Computing

Das Forschungsgebiet Organic Computing ist seit dem 1. Juli 2005 ein auf sechs Jahre angelegtes, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördertes Schwerpunktprogramm [107]. Das Ziel dieses Schwerpunktprogramms besteht darin, die Mechanismen von Selbstorganisation kontrolliert für die Beherrschung komplexer technischer Systeme zu nutzen.

Mit zunehmender Integration technischer Systeme in unserem Alltag und den sich entwickelnden Bereichen und Einsatzgebieten wachsen auch die Ansprüche an technische Systeme. Das führt zu immer komplexeren Systemen. Die Folge ist ein Zuwachs in der Einbettung spezialisierter Hardware und Software in technische Systeme aller Art. Angefangen bei Fabrikationsanlagen, über technische Fortbewegungsmittel wie Kraftfahrzeuge, Flugzeuge und Schiffe, bis hin zu den verschiedensten Telekommunikationsgeräten und Telekommunikationsnetzen. Ein Beispiel für die hohe Dichte an Hardware- und Softwaresystemen sind mobile Roboter. Sie zeichnen sich durch eine Vielzahl von Sensoren, Aktoren und deren Vernetzung aus. Oft sind einzelne Sensoren oder Sensorgruppen an eigene Hardwarekomponenten zur Vorverarbeitung von Signalen gekoppelt. Auch Aktoren werden durch eingebettete Hardwarekomponenten gesteuert. Dazu kommt die Vernetzung weiterer Hardware- und Softwarekomponenten zur Auswertung von Sensorsignalen und zur Bewegungsberechnung von Gruppen mehrerer Aktoren.

Die Komplexität der Steuerung diverser heterogener, vernetzter Einzelsysteme trifft allgemein auf viele der heutigen Systeme zu. Mit der zunehmenden Komplexität nimmt auch der Aufwand für die kontrollierte Steuerung und für die sichere Handhabung dieser

Systeme zu. Im Gegensatz zu technischen Systemen, die heute nicht selten an die Grenzen ihrer sicheren Handhabung und Steuerung stoßen, zeigen hoch komplexe biologische Systeme eine erstaunliche Anpassungsfähigkeit an die verschiedensten Umwelteinflüsse. Zahlreiche Strukturen in der Natur bilden sich aus dem Zusammenspiel vieler Einzelsysteme. Angefangen bei Molekülen, einzelligen oder mehrzelligen Organismen kann dies auf verschiedenen Ebenen beobachtet werden. Durch Selbstorganisation einzelner Einheiten formen sich so globale Strukturen, basierend auf selbstorganisierenden lokalen Prozessen. Dieses Phänomen wird Emergenz genannt. Zahlreiche Beispiele für selbstorganisierende, respektive emergente Prozesse werden in [11] vorgestellt.

Das Organic Computing Programm untersucht die grundlegenden Prinzipien und Mechanismen, auf denen die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit organischer Strukturen beruht, und evaluiert die Übertragbarkeit dieser Prinzipien und Mechanismen auf technische Systeme. Die Inspirationsquellen für Organisationskonzepte reichen dabei von der Molekülebene bis hin zu Gesellschaftsebenen. Die sehr offene Herangehensweise führt nach Müller-Schloer [86] zu der Definition eines organischen Computers als: *„Ein selbstorganisierendes System, das sich den jeweiligen Umgebungsbedürfnissen dynamisch anpasst. Organische Computersysteme haben sogenannte Selbst-X-Eigenschaften: Sie sind selbstkonfigurierend, selbstoptimierend, selbstheilend, selbsterklärend und selbstschützend.“*

Unter dieser Definition werden im Forschungsgebiet des Organic Computing drei große Forschungsziele definiert:

- Verständnis der Prinzipien der Selbst-Organisation natürlicher Systeme
- Umsetzung dieser Prinzipien in technisch nutzbare Verfahren und Werkzeuge
- Praktische Nutzung in technischen Anwendungen

Der Name „Organic Computing“ geht auf die vorgestellten Selbst-X-Eigenschaften zurück, die in der Regel organische Strukturen auszeichnen. Organische Materialien zum Rechnen werden im Organic Computing nicht eingesetzt.

Einen verwandten Wissenschaftszweig aus der Biologie stellt die biologische Kybernetik dar. Die biologische Kybernetik untersucht Steuerungs- und Regelungsprozesse sowohl in biologischen Organismen als auch in Ökosystemen. Ihr Fachgebiet reicht von einfachen Regelkreisen wie der Regulierung der Körpertemperatur und Stoffwechselprozessen über Wirkungsgefüge und Gleichgewichtsprozesse in der Ökologie bis hin zur Regelung von Fortbewegung und Laufen bei biologischen Organismen.

Im Gegensatz zum Organic Computing stehen in der biologischen Kybernetik das Verständnis und die wissenschaftliche Erklärung biologischer Steuerungs- und Regelungsprozesse im Vordergrund. Die gelegentliche Übertragung dieser Prozesse auf technische Systeme dient in der biologischen Kybernetik der Evaluierung und Verifizierung der wissenschaftlichen Thesen. Dies entspricht dem ersten Forschungsziel des Organic Computing Programms. Auch hier werden biologische Regelungsprozesse und Prinzipien untersucht. Im Organic Computing Programm geht es allerdings um das Extrahieren selbstorganisierender Mechanismen und ihrer gezielten Übertragung auf technische Systeme sowie die Evaluierung des praktischen Nutzens für die Anwendung.

Noch stärkere Überschneidungen und Bezüge zeigt Organic Computing zu der IBM Initiative Autonomic Computing [62]. In der Autonomic Computing Initiative werden die Übertragungsmöglichkeiten biologischer Eigenschaften wie Selbst-Konfiguration, Selbst-Heilung, Selbst-Organisation und Selbst-Schutz auf technische Systeme untersucht. Während sich die Autonomic Computing Initiative auf die Komplexitätsbeherrschung großer Serverarchitekturen konzentriert, wird im Organic Computing allgemein das globale Verhalten eines Gesamtsystems, basierend auf lokalen Interaktionen, in den verschiedensten Fachrichtungen betrachtet, insbesondere auch die Beherrschung nicht vorhersagbarer, globaler Effekte in komplexen technischen Systemen. Die Fachgebiete, in denen der Einsatz von Organic Computing bereits erforscht wird, reichen von der Untersuchung biochemischer Prozesse als Programmierparadigma [25] über Schwarmintelligenz [10] und dem energieoptimierten Routing in Sensornetzen [103] bis hin zu parallelisierten Kamerachips zur Objektkontur- und Objektschwerpunkterkennung in Echtzeit [43]. Auch die Untersuchung des Straßenverkehrs unter Organic Computing Aspekten wird erforscht [39].

Der Einsatz selbstorganisierender Strukturen löst in der Regel emergente Prozesse aus. Hierbei ist zwischen erwünschten und unerwünschten emergenten Prozessen zu unterscheiden. Der zielgerichtete Einsatz von Selbstorganisation kann emergente Prozesse auslösen, die die Robustheit des Systems fördern. Der Einsatz kontrollierter und zielgerichteter Selbstorganisation in technischen Systemen birgt allerdings auch das Risiko des Entstehens unerwünschter emergenter Prozesse, die das Gesamtsystem störend beeinflussen. Im Organic Computing wird daher auch die Problematik der Sicherheit, Robustheit und Stabilität selbstorganisierender technischer Systeme gefordert und untersucht. Die Forderung nach Robustheit, Flexibilität und Fehlertoleranz ist eine der wesentlichen Herausforderungen im Organic Computing. Hier stellt sich die Frage nach der Systemgestaltung, um Funktionalitätsadaptivität und gleichzeitige Reaktionsrobustheit bei Veränderungen des Einsatzgebiets zu erreichen. Darüber hinaus stellt sich die Frage nach Evaluationsmöglichkeiten für Systemeigenschaften wie Robustheit, Flexibilität und Autonomie.

Im Rahmen dieser Arbeit wird, basierend auf den Organic Computing Konzepten, die kontrollierte Selbstorganisation eines hexapoden, autonomen, mobilen Roboters untersucht. Zusätzlich werden Prinzipien zum kontrollierten Selbstschutz sowie zur Selbstheilung und Selbstkonfiguration betrachtet. Für die biologisch inspirierte Steuerung wird die Kontrollarchitektur ORCA (Organic Robot Control Architecture) eingesetzt. Als Zielplattformen dienen hierbei eingebettete Echtzeitsysteme im Allgemeinen und autonome, mobile Roboter im Speziellen. Der folgende Abschnitt stellt die grundlegenden Eigenschaften der Kontrollarchitektur ORCA vor und erläutert diese an einem beispielhaften Ausschnitt der Robotersteuerung.

3.3.2 Die Kontrollarchitektur

Das ORCA-Konzept beinhaltet zwei Modultypen, die Basic Control Unit (BCU) und die Organic Control Unit (OCU), die sowohl hierarchisch als auch heterarchisch organisiert werden können [7, 88]. Über eine einheitliche Schnittstelle können die Modultypen BCU und OCU miteinander kommunizieren und in Interaktion treten.

Die BCU ist das Standardmodul zur Implementierung vordefinierter Funktionen. Die BCU kapselt eine spezifische Funktionalität oder vereint verschiedene andere BCUs. Somit kann ein voll funktionsfähiges System ausschließlich aus BCUs bestehen. Die OCU ist ein Modul zur Überwachung und Beobachtung anderer Module. Sie kann sowohl BCUs als auch andere OCUs überwachen. Über die einheitliche Schnittstelle kann die OCU Daten austauschen oder Einfluss auf andere BCUs und OCUs nehmen.

Im Gegensatz zur BCU werden in der OCU keine Funktionen zur Robotersteuerung implementiert. Die OCU wird zur Implementierung von Überwachungsalgorithmen eingesetzt. Die Überwachungsfunktionalität der OCUs ist durch die Funktionsweise des biologischen Immunsystems inspiriert. Wie beim biologischen Immunsystem wird von einem „gesunden“ Zustand ausgegangen und auf Abweichungen oder Störungen der „gesunden“ Funktionsweise reagiert. Eine simple Methode zur Überwachung entspricht der Definition eines Toleranzbandes um die „gesunden“ Signale. Dabei werden die von einer BCU generierten Signale beobachtet und mit einem vordefinierten Normalbereich verglichen. Es wird überprüft, ob sich die BCU-Werte innerhalb dieses Normalbereichs befinden oder ihn durch Über- oder Unterschreiten seiner definierten Grenzen verlassen. Die definierten Grenzen bilden dabei ein Band, in dem Signalschwankungen toleriert werden. Signale, die dieses Toleranzband verlassen, werden als Anomalien definiert. Dabei ist zwischen langzeitigen oder zyklischen Anomalien und kurzzeitigen oder vereinzelt Anomalien zu unterscheiden. Weitere Konzepte zur Detektion von Anomalien wurden im Rahmen des ORCA-Projekts auf Basis von Mutual Information Methoden [78] und Fuzzy-Logik entwickelt [8, 66].

Die OCU hat neben der Detektion langfristiger und zyklischer Anomalien die Aufgabe, auf diese Anomalien zu reagieren. Eine Reaktion kann von einer Parameteranpassung über die Funktionsmodifikation bis hin zur Deaktivierung des entsprechenden Moduls reichen. Während die OCU erst bei lang anhaltenden Anomalien oder bei zyklisch auftretenden Anomalien aktiv wird, können spezielle BCUs auf kurzzeitige oder einmalige beziehungsweise vereinzelt Anomalien reflexartig reagieren.

Weiterhin sieht das ORCA-Konzept eine Gedächtniskomponente für die beiden Module vor. Diese Gedächtniskomponente dient den BCUs zum Selbstoptimieren durch Auswahl der besten Parameter aus dem Gedächtnis. Bei der OCU wird die Gedächtniskomponente um eine Lerneinheit ergänzt. Mit dieser Lerneinheit können zum Beispiel Reaktionen auf noch unbekannte Anomalien erlernt werden.

Der Grundaufbau des hier beschriebenen ORCA-Konzepts basiert auf dem unter 3.2 dargestellten „Module Controller Architecture-Konzept“ des Forschungszentrums Karlsruhe [115, 119]. Streng genommen handelt es sich bei dem ORCA-Konzept um eine Erweiterung der MCA2 um die oben eingeführten OCUs und ihrer Eigenschaft zur selbstständigen Organisation.

In Abbildung 3.4 ist ein beispielhafter Ausschnitt aus einer Robotersteuerung nach dem ORCA-Prinzip dargestellt. Die Abbildung zeigt zwei durch eine gestrichelte Linie getrennte Ebenen: die Planungsebene und die reaktive Verhaltensebene. Eine zweite gestrichelte Linie deutet den Übergang zur nächsten tiefer gelegenen Ebene an. Die Planungsebene besteht in diesem Fall aus zwei Modulen: einer BCU, die für die Planung verantwortlich ist, und einer OCU zur Überwachung der BCU. Die OCU kann im Falle einer auftretenden

Anomalie eine Umplanung durch Modifikation der BCU-Parameter auslösen. OCU und BCU tauschen über zwei Schnittstellen Daten aus. Zum einen sendet die BCU die aktuellen Eingabewerte und Funktionsergebnisse zur OCU und zum anderen kann die OCU Steuerungsparameter zur BCU weitergeben.

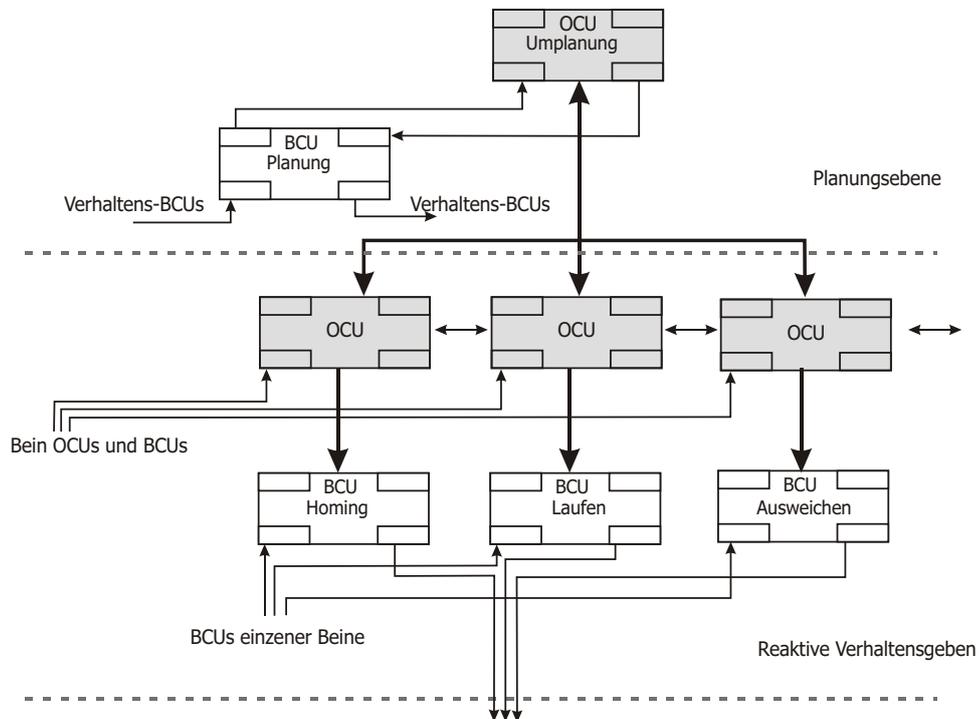


Abbildung 3.4: Beispielhafter Ausschnitt einer Robotersteuerung nach dem ORCA-Prinzip mit charakteristischer Interaktion von OCUs und BCUs auf zwei Ebenen (Planung und reaktives Verhalten). BCUs stehen untereinander ebenenübergreifend in Verbindung und werden von OCUs überwacht.

Auf der reaktiven Verhaltensebene ist das gleiche BCU-OCU-Konzept beispielhaft für die drei Verhalten „Homing“, „Laufen“ und „Ausweichen“ aufgeführt. Die BCUs sind ebenenübergreifend miteinander verbunden. Dabei sendet eine BCU ihre aktuellen Daten und Werte zu einer BCU in der nächsthöheren Ebene und wird von dieser mit Kontrollparametern versorgt. Auch die OCUs sind über die Ebenengrenzen miteinander und zusätzlich innerhalb der Ebenen untereinander verbunden und können Informationen über ihre BCUs austauschen oder sich gegenseitig überwachen. So steht zum Beispiel die OCU auf Planungsebene mit jeder OCU auf der reaktiven Verhaltensebene in Verbindung und kann direkt auf Veränderungen reagieren.

Zum tieferen Verständnis wird im Folgenden anhand eines anschaulichen Beispiels die Rolle der OCU erläutert. Die Planungs-BCU kann zur Durchführung einer definierten Mission das Vorgehen des Roboters planen und zur Umsetzung des Plans auf die BCUs

aus der reaktiven Verhaltensebene zurückgreifen. So kann zum Beispiel, abhängig vom Gelände, erst das einfache Laufen in Kombination mit dem Ausweichverhalten und ab einer spezifizierten Position dann ein Suchverhalten aktiviert werden. Sofern keine äußeren Störungen oder internen Anomalien auftreten, bleiben die OCUs passiv im Hintergrund tätig und überwachen die Funktion der BCUs. Wird eine Anomalie detektiert und die Funktionalität einer BCU von einer OCU als eingeschränkt, fehlerhaft oder nicht mehr vorhanden eingestuft, müssen die OCUs aktiv in die Steuerung eingreifen.

Es kann zum Beispiel bei der Überwachung der Ausweichfunktionalität in der entsprechenden BCU festgestellt werden, dass sich nicht alle benötigten Sensorwerte im vordefinierten Normalbereich befinden. So können Sensorwerte auf der linken Roboterseite als fehlerhaft eingeschätzt werden und von der überwachenden OCU von der weiteren Datenverarbeitung ausgeschlossen werden. Das kann zur Folge haben, dass das Ausweichverhalten nur noch eingeschränkt funktioniert und der Roboter ausschließlich nach links ausweichen kann. Diese Information muss von der entsprechenden OCU auf reaktiver Verhaltensebene an die nächst höhere, in diesem Fall die OCU auf Planungsebene, weitergegeben werden. Auf Planungsebene kann nach Eingang der Information die aktuelle Planung in der entsprechenden BCU gestoppt werden. Die OCU kann nun unter Berücksichtigung der eingeschränkten Ausweichfunktionalität eine Neuplanung aktivieren. In diesem Beispiel kann eine Reaktionsmöglichkeit darin bestehen, hindernisreiches Gelände bevorzugt mit der rechten Roboterseite anzulaufen, um die eingeschränkte Ausweichfunktionalität weiter nutzen zu können.

Kapitel 4

Die sechsbeinige Robotertestplattform

Inhalt

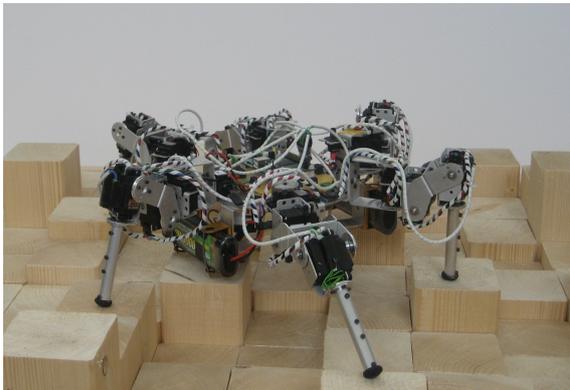
4.1	Robotertestplattform OSCAR	35
4.1.1	Aufbau und Skelett	36
4.1.2	Aufbau der Beine	36
4.1.3	Aktoren und Elektronik	37
4.2	Physikalische 3D-Simulation	39

4.1 Robotertestplattform OSCAR

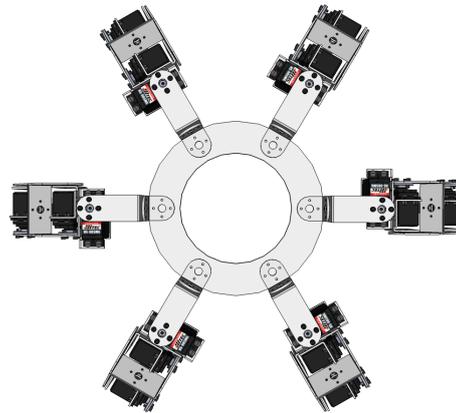
Als Robotertestplattform für das ORCA-Konzept dient ein symmetrischer, sechsbeiniger Laufroboter mit 18 Freiheitsgraden, basierend auf standardisierten Bauteilen. Auf der Laufmaschine OSCAR (Organic Self-Configuring and Adapting Robot) werden die ORCA-Prinzipien exemplarisch implementiert und evaluiert. Die ORCA-Prinzipien werden nicht für eine spezifische Maschine entwickelt. Die OSCAR-Plattform dient lediglich als sechsbeinige Testmaschine, die ihre eigenen Vor- und Nachteile mit sich bringt. Eine hexapode Laufmaschine bietet durch die sechs Beine und 18 Freiheitsgrade einen hohen Grad an Redundanz. Weiterhin kann mit einer Laufmaschine ein hohes Maß an Mobilität erreicht und gleichzeitig ein statisch stabiles Laufen umgesetzt werden. Durch die Verwendung von Standardbauteilen zum Bau des Roboters müssen die fehlenden mechanischen Spezialisierungen einer Laufmaschine durch eine intelligente Softwarearchitektur kompensiert werden. Zusätzlich zu der hohen Redundanz bringt sechsbeiniges Laufen den Vorteil der statischen Stabilität bei relativ hoher Geschwindigkeit mit sich. Im Gegensatz zu zwei- oder vierbeinigem Laufen können bei sechsbeinigem Laufen drei Beine ständig im Kontakt mit dem Untergrund bleiben und für einen sicheren Stand sorgen, während die drei anderen Beine sich zu ihrer nächsten Stützposition bewegen.

Technische Daten OSCAR

Die Laufmaschine OSCAR besitzt einen Ring als Grundkörper, an dem im gleichmäßigen Abstand von 60° die sechs Beine mit je drei Freiheitsgraden angeordnet sind. Durch diesen symmetrischen Grundaufbau hat der Roboter keine Vorzugsrichtung und kann ohne kom-



(a) Foto der OSCAR Plattform



(b) Draufsicht auf OSCAR Modell

Abbildung 4.1: Foto und schematische Abbildung der hexapoden Laufmaschine OSCAR

plizierte Wendemanöver einen schnellen Richtungswechsel durchführen. Tabelle 4.1 gibt einen kurzen Überblick über die technischen und geometrischen Daten der Laufmaschine.

4.1.1 Aufbau und Skelett

Der Körper des Roboters besteht aus einem Ring mit 3 mm Blechstärke, einem Außendurchmesser von 175 mm und einem Innendurchmesser von 85 mm . In einem Abstand von je 60° sind die sechs Beine montiert. Diese Anordnung bietet einen kompakten Körperbau mit einem großen horizontalen Bewegungsspielraum. In Abbildung 4.1 ist in a) ein Foto der OSCAR Plattform und in b) eine Draufsicht auf ein schematisches Modell des Roboters abgebildet.

4.1.2 Aufbau der Beine

Der Roboter besitzt sechs identisch aufgebaute Beine. Ein Bein setzt sich aus drei Segmenten und drei Gelenken zusammen. Die Segmente bestehen aus standardisierten Bauteilen, die durch Servomotoren verbunden werden. Die Servomotoren entsprechen den Gelenken. Diese drei aktiven Freiheitsgrade erlauben einen großen Arbeitsbereich des Beins. Über die Beinbewegung in diesem Arbeitsbereich wird der Roboterkörper im Raum bewegt. Abbildung 4.2 zeigt den modellierten Arbeitsbereich eines Beins aus vier Ansichten: oben links ist eine Draufsicht, oben rechts eine Frontalansicht, unten links eine Profilansicht und unten rechts eine perspektivische Ansicht auf den Arbeitsbereich des Beins dargestellt.

Durch die drei Freiheitsgrade des Beins kann der Fußpunkt an einer beliebigen Stelle innerhalb des dreidimensionalen Arbeitsbereichs des Beins positioniert werden. Die drei rotatorischen Gelenke des Beins werden vom Körper ausgehend mit α , β und γ bezeichnet. Die Verkettung der drei rotatorischen Gelenke ist wie folgt aufgebaut: Das α -Gelenk ist senkrecht zur Grundebene des Roboterkörpers angebracht. Das β -Gelenk steht senkrecht

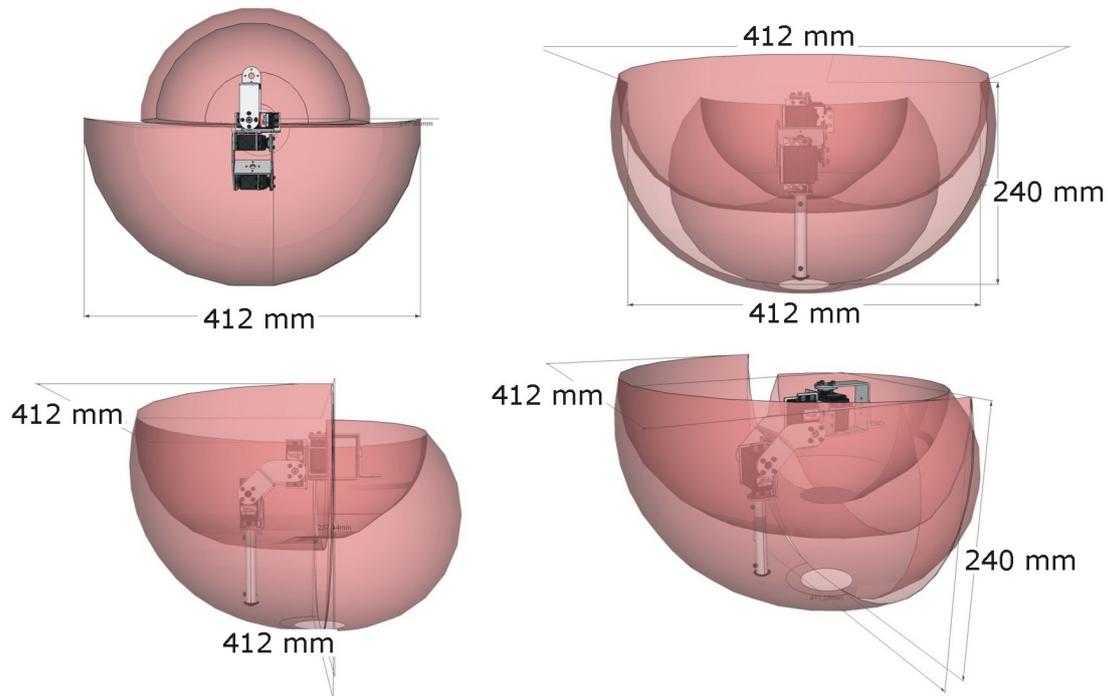


Abbildung 4.2: Arbeitsbereich des Beins

zum α -Gelenk und das γ -Gelenk ist parallel zum β -Gelenk angebracht. Die Anordnung der Gelenke ist an der Anatomie von Insektenbeinen angelehnt. Die Anatomie eines Stabheuschreckenbeins und der mechanische Aufbau des Roboterbeins werden in Abbildung 4.3 schematisch dargestellt.

Abbildung 4.3 a zeigt bei dem biologischen Bein, dass der Tarsus aus mehreren Segmenten besteht. Das Roboterbein besitzt keinen Tarsus und kann ohne zusätzliche Freiheitsgrade einen Fuß nicht räumlich ausrichten. Das letzte Segment des hier eingesetzten Roboterbeins ist am Fußpunkt zu einem Kugelfuß abgerundet. Ein Kugelfuß hat die Eigenschaft, beim Auftreten einen punktförmigen Bodenkontakt herzustellen und umgeht die Problematik der fehlenden räumlichen Ausrichtungsmöglichkeit. Die Alternative zu einem Kugelfuß ist ein breitflächiger Fuß mit zusätzlichen passiven Gelenken. Ein Beispiel für den Einsatz passiver Gelenke im Roboterfuß ist der Laufroboter Katharina [111, 113].

4.1.3 Aktoren und Elektronik

Als Aktoren werden in der OSCAR-Plattform Standard-Modellbau-Servomotoren der Firma HiTec eingesetzt. Die Servomotoren vom Typ HS-985MG sind durch den Austausch der internen Platine modifiziert und in ihrer Funktionalität erweitert worden. Die interne Elektronik wurde durch OpenServo-Module [89] ersetzt. Die OpenServo-Module ermöglichen im Gegensatz zu dem ursprünglichen Servomotor-Controller die Abfrage des

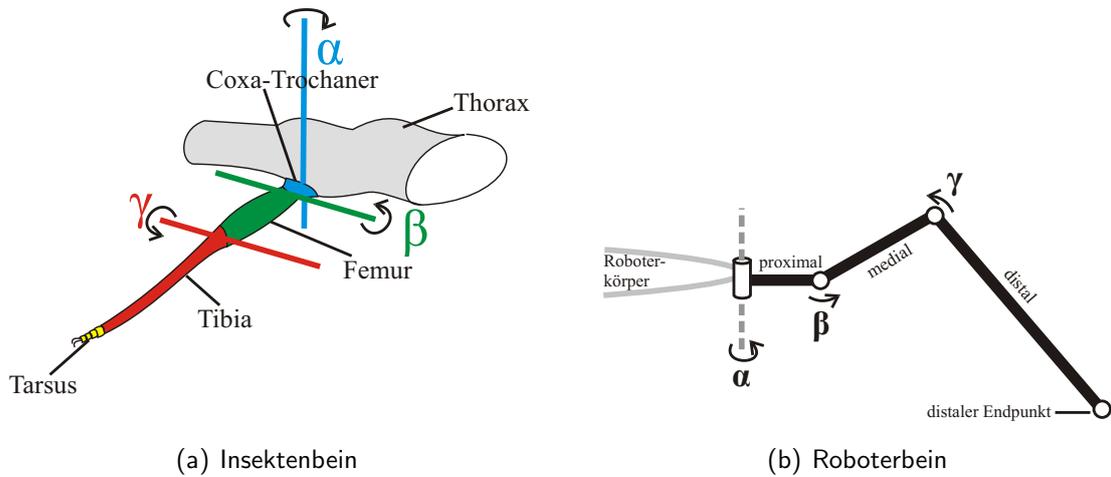


Abbildung 4.3: a) Schematische Darstellung eines Insektenbeins mit den Segmenten Coxa-Trochanter, Femur, Tibia und Tarsus und den Gelenken α , β und γ . b) schematische Darstellung des Roboterbeins mit den entsprechenden Segmenten, ohne Tarsus. Das α -Gelenk ist senkrecht zur Grundebene des Roboterkörpers, das β -Gelenk senkrecht zum α -Gelenk und das γ -Gelenk parallel zum β -Gelenk angeordnet.

aktuellen Stromverbrauchs und der aktuellen realen Position. Darüber hinaus bieten die OpenServo-Module eine zusätzliche Ansteuerungsmöglichkeit der Motoren über hermite Kurven. Durch die hermiten Kurven können komplexe Positionstrajektorien über die Zeit angefahren werden. In jedem Fuß der OSCAR-Plattform ist ein Taster eingebaut, der über ein binäres Signal den Bodenkontakt des Fußes signalisieren kann. Kräfte, die auf die einzelnen Gelenke wirken, können indirekt über den aktuellen Stromverbrauch der Servomotoren ermittelt werden. Die Steuerungssoftware wird für den autonomen Betrieb auf

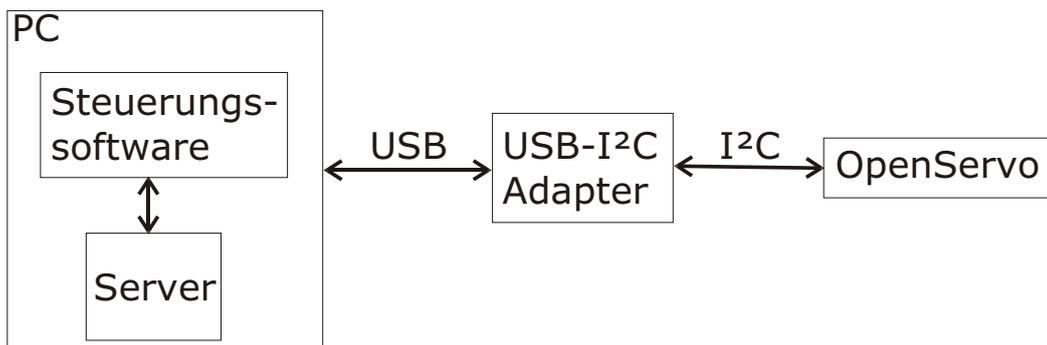


Abbildung 4.4: Kommunikation der Hardwarekomponenten

einem Netbook des Typs eeePC ausgeführt. Das Display des Netbooks wurde entfernt.

Tabelle 4.1: Technische und geometrische Daten der OSCAR-Testplattform

Grundaufbau	
Grundkörper	Aluminiumring
Anordnung der sechs Beine	im Abstand von 60°
Freiheitsgrade	3 pro Bein
Gelenkbezeichnung distal	α, β, γ
Gesamtgewicht	ca. 3 kg
Maße des Grundkörperings	
Außendurchmesser	175 mm
Innendurchmesser	85 mm
Blechdicke	3 mm
Segmentlängen der Beine	
proximales Segment	30 mm
mediales Segment	60 mm
distales Segment	120 mm
Arbeitsbereich der Gelenke	
Protraktion und Retraktion α	-90° bis $+90^\circ$
Elevation und Depression β	-60° bis $+90^\circ$
Extension und Flexion γ	-60° bis $+120^\circ$
Antriebe	HiTec HS-985MG
Motorkontroller	OpenServo Module

So kann das Netbook unter den Roboterkörper befestigt von der Laufmaschine getragen werden. Neben der Steuerungssoftware wird ein Server auf dem PC ausgeführt, über den die Kommunikation mit einem USB-I²C-Adapter der Firma DIOLAN läuft. Der Adapter übergibt per I²C-Bus die Kommandos an die OpenServo-Module und sendet angefragte Werte zurück an den PC. In Abbildung 4.4 ist eine schematische Abbildung dargestellt, welche die einzelnen Hardwarekomponenten und ihre Verbindung untereinander zeigt.

4.2 Physikalische 3D-Simulation

Für die Entwicklung und Evaluation neuer Softwaremodule und Kontrollarchitekturweiterungen ist eine physikalische Simulation der Roboterplattform für die ersten Entwicklungsschritte sehr nützlich. Ein neues Verhalten oder Änderungen bereits vorhandener Softwarekomponenten können in einer Simulation einfach getestet werden. Dies erspart die Vorbereitung der Hardwareplattform für kurze Tests und mindert den Verschleiß der einzelnen Hardwarekomponenten. Eine physikalische Simulation ersetzt nicht die endgül-

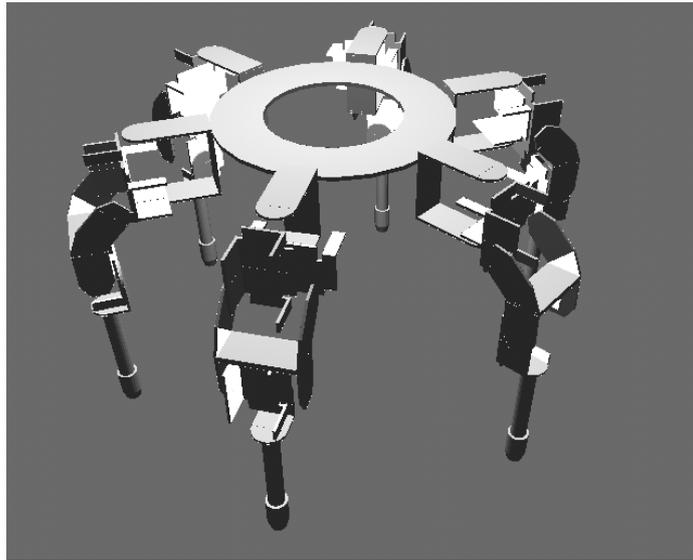


Abbildung 4.5: 3D Modell der Roboterplattform OSCAR

tigen Tests auf der Hardwaremaschine, kann aber zahlreiche einfache Evaluierungen vor einer nötigen Übertragung auf die Hardware übernehmen.

Im Folgenden wird die dreidimensionale Modellierung der Roboterplattform beschrieben. Im Anschluss folgt die Darstellung der physikalischen Simulation der Maschine und abschließend wird kurz auf die implementierte Schnittstelle zu der Robotersteuerung eingegangen.

Modellierung des Roboters

Für die dreidimensionale Visualisierung der Roboterplattform sind die einzelnen Verbindungselemente des Skeletts modelliert und zu einem Gesamtskelett zusammengesetzt worden. Abbildung 4.5 zeigt das dreidimensionale Modell der Roboterplattform. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Servomotoren nicht modelliert wurden. Die grafische Visualisierung des Roboters und seiner modellierten Umgebung wird mit dem jMonkey Engine (jME)-Programmiergerüst dargestellt [61]. Die JMonkey Engine ist eine leistungsstarke, in Java geschriebene API, die auf einem 3D Szenengraphenkonzept basiert. Das jME-Projekt unterstützt auch den Einsatz des Open-Source Projekts Java OpenGL (JOGL) [72] als Java-Einbindung der Open Graphics Library (OpenGL) [82].

Simulation des Roboters

Zur Simulation dreidimensionaler Modelle erlaubt jME eine Kombination der grafischen Darstellung mit der physikalischen Simulationsebene jME Physics [58]. jME Physics ist eine abstrakte Schnittstelle zur Einbindung von Physikbibliotheken in jME. Die ursprüngliche Implementierung von jME Physics basiert auf der Integration der Open Dynamic Engine (ODE) [59] und ODE Java. Über den Szenengraphen können die einzelnen modellierten Objekte um ihre physikalischen Eigenschaften, wie Masse und Masseschwerpunkt

oder Materialeigenschaften, ergänzt werden. So können verschiedene Reibungseigenschaften zwischen Materialien simuliert werden.

Der reale Roboter besitzt am Fußende eine Gummikappe, um trotz der kleinen Aufttrittsfläche des Kugelfußes das Rutschen über den Untergrund zu vermeiden. Durch die Gummikappe wird, bedingt durch die Materialeigenschaft des Gummis, der Kontaktwiderstand zwischen Fußpunkt und Untergrund erhöht. Mit der jME Physics Umgebung kann der simulierten Gummikappe ebenfalls die Materialeigenschaft von Gummi zugewiesen werden. Nach Bestimmung der Massen für die einzelnen Roboterbauteile wurden die Massen den modellierten Objekten zugewiesen. Die Servomotoren sind in der 3D-Simulation aus Kostengründen nicht visualisiert worden. Die einzelnen Massen der Servomotoren sind ohne Visualisierung den entsprechenden Punkten für die Servomotoren zugewiesen und in dem physikalischen Modell repräsentiert. Durch die Zuweisung der physikalischen Eigenschaften der einzelnen Roboterteile kann ein realitätsnahes Verhalten des Roboters simuliert werden. Abbildung 4.6 zeigt einen Screenshot aus der Simulation, in der sich das physikalische Robotermodell in einer simulierten Umwelt bewegt.

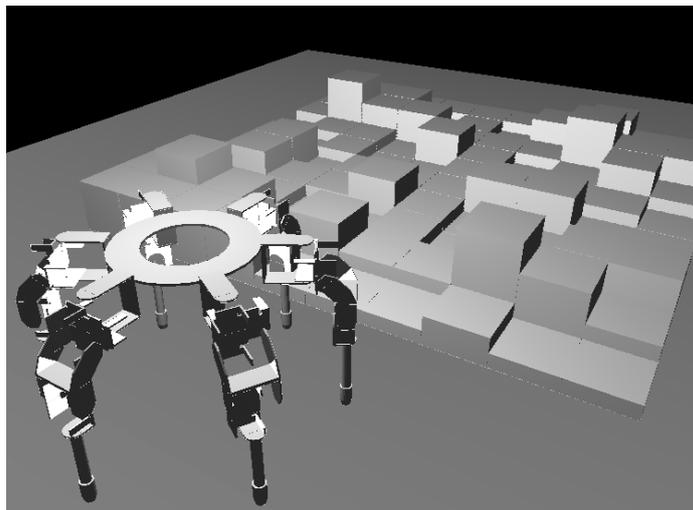


Abbildung 4.6: 3D Modell in Simulation mit Umgebung

Schnittstelle zwischen Steuerung und Simulation

Neben dem realitätsnahen, physikalischen Verhalten der Robotersimulation war die einfache Ansteuerung der Simulation ein wichtiges Kriterium bei der Entwicklung. Um möglichst einfach zwischen Simulation und realer Maschine wechseln zu können, wurde eine Schnittstelle implementiert, die es erlaubt, die originale Steuerungssoftware für die Laufmaschine auszuführen. Für die Integration der Schnittstelle in die Simulation mussten zwei weitere Hardwarekomponenten simuliert werden: die USB-I²C Schnittstelle und die Servomotor-Steuerungseinheit. Der USB-I²C Adapter kommuniziert über eine TCP/IP Verbindung und einen implementierten Server auf dem Steuerungsrechner mit der Steuerung. Für die Simulationsschnittstelle wurde ein eigener Server und eine Simulation des

Adapterverhaltens implementiert. In Abbildung 4.4 ist die Kommunikation zwischen den

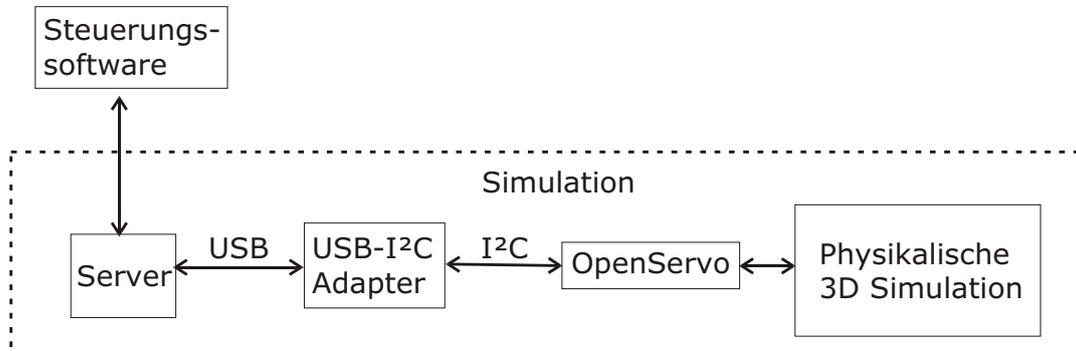


Abbildung 4.7: Kommunikation und Umsetzung der Simulationskomponenten

einzelnen Hardware-Komponenten und in Abbildung 4.7 die Kommunikation der simulierten Komponenten schematisch dargestellt. In Abbildung 4.4 oben stellen ein PC, der USB-I²C-Adapter und das OpenServo-Modul je eigene Hardwarekomponenten dar. Dabei ist der PC, auf dem die Steuerungssoftware und ein Server für die Kommunikation ausgeführt werden, über ein USB-Kabel mit dem Adapter und dieser über einen I²C-Bus mit dem OpenServo-Modul verbunden.

Für die realitätsnahe Simulation wurden sowohl der Server, der USB-I²C-Adapter als auch das OpenServo-Modul simuliert, damit die Steuerungssoftware ohne Modifikation sowohl die Roboterplattform, als auch die physikalische 3D-Simulation steuern kann.

Die OpenServo-Module, die als Servomotor-Controller in die Servomotoren eingebaut sind, führen nach dem Empfang neuer Daten intern eigene Berechnungen aus, bevor sie die Servomotoren ansteuern. Die OpenServo Module können die Servomotoren mit komplexen Bewegungsabläufen über hermite Kurven als Funktion von Position über der Zeit ansteuern. Die Kurven werden durch die Definition verschiedener Punkte im Positions-Zeit-Koordinatensystem beschrieben. Jeder Punkt wird durch die drei Parameter „Position“, „Zeit“ und „Tangente“ beschrieben. Da die Umrechnung dieser Punkte in eine Kurve auf dem OpenServo-Modul stattfindet, musste auch diese Funktionalität simuliert werden. Das OpenServo-Modul wurde mit den entsprechenden Registern implementiert, so dass die Steuerungssoftware über den simulierten USB-I²C Adapter auf die gleichen Register zugreifen kann wie in der realen Maschine. Die Umrechnung der übergebenen Parameter in den entsprechenden Bewegungsablauf findet somit in den simulierten OpenServo Modulen statt.

Die durch die implementierte Schnittstelle erreichte Kompatibilität zu der Robotersteuerung ermöglicht eine einfache und realitätsnahe Simulation neuer Verhalten und Modifikationen. Mit der physikalischen Robotersimulation kann schnell und einfach ein Verhalten in aufwendigen Testszenerien evaluiert werden, bevor der Test auf der realen Plattform durchgeführt wird.

Da die physikalische 3D-Simulation erst zum Ende dieser Arbeit fertig gestellt und evaluiert wurde [6], ist sie im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr zum Einsatz gekommen. Alle Ergebnisse dieser Arbeit stammen aus Experimenten mit der realen Robotertestplattform.

Kapitel 5

Kontrollarchitektur - BCU Implementierungen

Inhalt

5.1	Dezentrales Laufen	46
5.1.1	Beinsteuerung	46
5.1.2	Beinkoordination	48
5.1.3	Laufmuster	51
5.2	Kurvenlaufen	55
5.2.1	Konzept	56
5.2.2	Lokale Kommunikation	57
5.3	Adaptives Laufen	58
5.3.1	Reflexe	59
5.3.2	Gelenknachgiebigkeit	59
5.3.3	Schrittreflex	65
5.3.4	Reflexbasiertes Laufen	70
5.3.5	Reflexe auf Beinebene	76
5.3.6	Bodendetektionsreflex	77
5.3.7	Suchreflex	82
5.3.8	Levatorreflex	89
5.3.9	Kombination der Reflexe	96
5.4	Zusammenfassung	100

Der biologische Bewegungsapparat besitzt in der Regel mehr Muskeln zur Bewegung seiner Segmente als das zugehörige Gelenk Freiheitsgrade besitzt und entspricht somit mathematisch einem unterbestimmten Gleichungssystem. Auf eine Extremität bezogen bedeutet dies, dass der distale Endpunkt der Extremität eine Position in seinem Aktionsradius durch verschiedene Gelenkstellungen der Extremität erreichen kann. Für eine der verschiedenen Alternativen muss sich der Organismus selbstständig entscheiden. Diese autonome Entscheidung der biologischen Organismen setzt eine motorische Intelligenz voraus, mit der

die Gelenkstellung der Gliedmaßen an die verschiedenen aktuellen Umgebungssituationen angepasst werden. Diese „intelligente“ Steuerung der Gliedmaßen sowie die Koordination verschiedener Gliedmaßen wird seit Jahrzehnten in der Biologie untersucht. Bereits 1943 stellte Holst [57] und 1964 Wendler [122] für die Steuerung und Koordination der sechs Beine bei Insekten die Grundidee einer dezentralen Kontrollstruktur vor. Chasserat und Clarc [13] präsentierten 1980 die Theorie, dass bei Krebsen jedes Bein in einem eigenen Rhythmus schwingt und stemmt. Die alternierende Schwing-Stemm-Bewegung eines Beins wurde später von Wendler und Bässler als Kippschwingmechanismus interpretiert. Trotz der Entdeckung individueller Beinrhythmen ist bei allen laufenden Organismen ein kleines Repertoire relativ fest erscheinender Gangmuster zu beobachten. Eine Theorie für die zugrunde liegende Koordination und die daraus resultierenden Gangmuster bei Stabheuschrecken wurde von Cruse 1990 [20] vorgestellt. Cruses dezentrales Konzept zur Steuerung der einzelnen Beine und zur Koordination der Beine untereinander basiert auf sechs Regeln. Diese Regeln wirken lokal zwischen den Beinen und unterstreichen die ersten Grundideen einer dezentralen Beinsteuerung.

Die in dieser Arbeit umgesetzte Laufsteuerung für die in Kapitel 4 vorgestellte Robotertestplattform basiert ebenfalls auf der Grundidee eines dezentralen Konzepts und baut auf den Erkenntnissen von dem von Cruse, Schmitz und Dürr vorgestellten Walknet [30] (siehe dazu auch Abschnitt 3.1) auf. Im Folgenden werden verschiedene Modulgruppen vorgestellt, die drei aufeinander aufbauende Grundelemente für die Steuerung einer Laufmaschine beschreiben: dezentrales Laufen, Kurvenlaufen und adaptives Laufen. Diese Grundelemente gehen fließend ineinander über und orientieren sich an aktuellen biologischen Erkenntnissen [9, 15, 28, 30, 106]. Die in diesem Kapitel vorgestellten Module werden ausschließlich durch BCUs implementiert und beschreiben die elementaren Konzepte der Steuerungsarchitektur und ihr Zusammenwirken.

5.1 Dezentrales Laufen

Das dezentrale Laufen orientiert sich an den oben genannten Arbeiten aus der Biologie. Im Folgenden werden die lokale Einzelbeinsteuerung, die auf lokalen Regeln basierende Beincoordination und das aus beiden resultierende Laufen beziehungsweise die emergenten Schrittmuster vorgestellt und erläutert.

5.1.1 Beinsteuerung

Im Gegensatz zu einem sich kontinuierlich drehenden Rad muss ein Bein alternierend zwei unterschiedliche Phasen durchlaufen: die Stemmphase und die Schwingphase. Diese Phasen bewegen das Bein zwischen seinen beiden Extrempositionen: der anterioren Extremposition (AEP) und der posterioren Extremposition (PEP). Es sind zwei Punkte im dreidimensionalen körperfesten Koordinatensystem, zwischen denen sich der distale Endpunkt des Beins bewegt. Abbildung 5.1 zeigt für ein Bein eine schematische Darstellung der Stemm- und Schwingtrajektorien des Fußpunktes zwischen PEP und AEP.



Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der Stemm- und Schwingtrajektorie des Fußpunktes zwischen PEP und AEP.

Die Extrempositionen beschreiben den aktuellen Aktionsradius, beziehungsweise den aktuellen, aktiven Arbeitsbereich des Beins, und unterscheiden sich von seinen physikalischen Extrempunkten. Im Gegensatz zu den physikalischen Extrempunkten, die den physischen „Anschlag“ des Beins beschreiben, ist der durch die AEP und PEP beschriebene Arbeitsbereich variabel und wird durch den aktuellen Abstand von AEP und PEP definiert. Die Variabilität des Arbeitsbereichs ermöglicht die Umsetzung verschieden langer Stemm- und Schwingphasen. Die Stemm- und die Schwingphase besitzen jeweils eigene charakteristische Merkmale.

Stemmphase

In der Stemmphase steht das Bein mit dem Fuß fest auf dem Untergrund und trägt einen Teil des zu bewegenden Körpergewichts. Während der Stemmphase wird das Bein hauptsächlich vom α -Gelenk bewegt. Die Beinbewegung verläuft relativ zum Körper in posteriore Richtung. Da der distale Endpunkt des Beins mit dem Untergrund an einem festen Punkt in Kontakt steht, übt die Bewegung des Beins eine Kraft auf den Körper des Roboters aus. Diese Kraft wirkt in anteriorer Richtung und stemmt den Körper nach vorne. Der distale Endpunkt des Beins bewegt sich im Bein-Koordinatensystem von der AEP zur PEP des Beins. Die Geschwindigkeit, mit der sich das Bein in der Stemmphase bewegt, ist variabel und wird zur Modifikation der Laufgeschwindigkeit des Roboters genutzt. Für die Stemmphase, in der das Bein den Körper stützt und ihn nach vorne drückt, haben sich verschiedene englische Begriffe in der Literatur durchgesetzt, die synonym verwendet werden: stance phase, power stroke, supporting phase.

Schwingphase

In der Schwingphase löst sich das Bein vom Untergrund und bewegt seinen distalen Endpunkt in einer bogenförmigen Trajektorie relativ zum Körper in anteriore Richtung. In der Schwingphase werden die drei Beingelenke α , β und γ bewegt. Das α -Gelenk bewegt das Bein relativ zum Körper in anteriore Richtung von der PEP zur AEP. Das β - und das γ -Gelenk führen gleichzeitig eine Levation und eine Flexion des Beins von der PEP zum Scheitelpunkt der Schwingtrajektorie sowie eine Depression und eine Extension des Beins vom Scheitelpunkt zur AEP aus. Ein wichtiger Unterschied zur Stemmphase besteht in der konstanten Geschwindigkeit, mit der sich das Bein in der Schwingphase bewegt. Das Bein bewegt sich in jeder Schwingphase mit gleicher Geschwindigkeit. Eine konstante Geschwindigkeit in der Schwingphase konnte auch bei der Stabheuschrecke *Carausius morosus* beobachtet werden [47]. Auch für die Schwingphase, in der das Bein sich zurück zum Startpunkt der Stemmphase bewegt und sich von der Stemmbewegung erholt, gibt es verschiedene Begriffe in der englischen Literatur, welche synonym verwendet werden: swing phase, return stroke, recovery phase.

Nach Erreichen der AEP zum Ende der Schwingphase wechselt das Bein in die Stemmphase. Gelangt das Bein zum Ende der Stemmphase in die PEP, wechselt es zurück in die Schwingphase. Die alternierende Ausführung von Stemm- und Schwingphase in einem eigenen Rhythmus gilt für jedes Bein und orientiert sich an der von Chasserat und Clarc präsentierten Theorie über den eigenen Beinrhythmus [13]. Der eigene Rhythmus in jedem Bein bildet zum einen die Grundlage für das Laufen, stellt zum anderen jedoch die Frage nach der Koordination der Beine untereinander.

5.1.2 Beinkoordination

Die Koordination zwischen den Beinen eines laufenden Systems entspricht einem Struktur erzeugenden Gesetz, wobei die Struktur in diesem Fall ein Schrittmuster ist. Cruse hat 1990 sechs lokale Koordinationsregeln vorgestellt, die bei der Stabheuschrecke *Carausius morosus* zu verschiedenen Schrittmustern führen [19]. Während jedes Bein einen eigenen Stemm-Schwing-Rhythmus hat und diesen durch die Variation der Stemmphasengeschwindigkeit ändern kann, ist die Koordination eine feste Regel. Diese Regel ist lokal in jedem Bein integriert und wird nicht aktiv variiert.

Für die Laufsteuerung des Sechsheinners in dieser Arbeit sind die statische Stabilität der Maschine und die zeitliche Abstimmung der Schwing- und Stemmphase benachbarter Beine die essentiellen Kriterien für eine stabile und flüssige Laufbewegung. Bei jedem Wechsel von der Stemm- in die Schwingphase wird ein den Körper tragendes Bein vom Boden gelöst. Dieser Wechsel stellt eine kritische Situation für die statische Stabilität der Maschine dar. Darüber hinaus kann auch die zeitliche Abstimmung der Beinrhythmen zu Instabilität und ruckartigen Bewegungen führen.

Um die beiden essentiellen Kriterien zu erfüllen, wird in dieser Arbeit eine lokale Koordinationsregel eingesetzt, die sowohl die statische Stabilität als auch das zeitliche Abstimmen der Beinrhythmen gewährleistet.

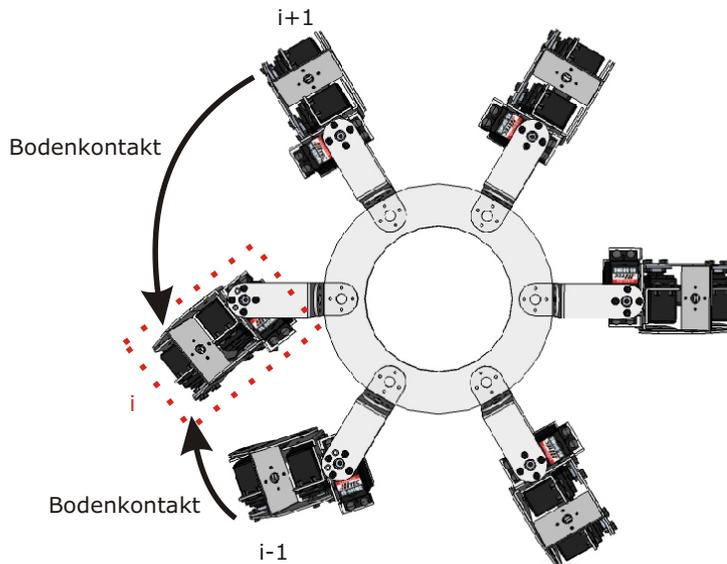


Abbildung 5.2: Koordinationsregel: Bein i erwartet von den Nachbarbeinen $i-1$ und $i+1$ ein Bodendetektionssignal, bevor es von der Stemm- in die Schwingphase wechseln darf.

5.1.2.1 Wechsel von der Stemm- in die Schwingphase

Die Koordinationsregel ist in jedem Bein integriert und verhindert für jedes Bein einen Wechsel von der Stemm- in die Schwingphase, solange nicht die beiden benachbarten Beine mit dem Untergrund in Kontakt stehen, das heißt sich nicht in der Stemmphase befinden und keinen Bodenkontakt signalisieren. Melden nicht beide Nachbarbeine die Detektion des Bodenkontakts, verlängert sich die Stemmphase des Beins und das α -Gelenk bewegt das Bein weiter über seine PEP hinaus in posteriore Richtung. Das setzt voraus, dass im Normalfall die Stemmbewegung des Beins nicht den vollen physikalischen Arbeitsbereich des Beins ausnutzt. Die PEP darf nicht am physischen „Anschlag“ des α -Gelenks liegen.

Signalisieren die beiden benachbarten Beine die Detektion des Bodenkontakts, erlaubt die Koordinationsregel des Beins den Wechsel in die Schwingphase. In Abbildung 5.2 ist eine Draufsicht auf drei Beine, $i-1$, i und $i+1$, dargestellt. Das mit einem rot gepunkteten Rahmen markierte Bein i wartet auf Bodenkontaktsignale seiner Nachbarbeine $i-1$ und $i+1$.

Durch diese Regel werden die beiden Kriterien „statische Stabilität“ und „temporäre Abstimmung“ erfüllt: Zum einen die statische Stabilität des Läufers, da maximal jedem zweiten Bein erlaubt werden kann zu schwingen, und zum anderen die temporäre Abstimmung benachbarter Beine, da die Stemmphase eines Beins verlängert wird, solange der Wechsel in die Schwingphase noch nicht erlaubt ist. Der folgende Pseudocode zeigt eine Umsetzung der Koordinationsregel, die für jedes mit i indizierte Bein ausgeführt wird.

Listing 5.1: Koordinationsregel

```
wenn :   bein [ i - 1 ]. hatBodenkontakt ( ) UND  
        bein [ i + 1 ]. hatBodenkontakt ( )  
dann :   bein [ i ]. schwingen ( ) ;  
sonst :  bein [ i ]. stemmen ( ) ;
```

5.1.2.2 Wechsel von der Schwing- in die Stemmphase

Der Wechsel von der Schwing- in die Stemmphase muss unmittelbar mit der Bodendetektion des jeweiligen Beines erfolgen. Sowohl ein zu früher als auch ein zu später Wechsel in die Stemmphase beeinflussen das Laufverhalten des Roboters negativ in Bezug auf die statische Stabilität und die zeitliche Abstimmung der Phasenwechsel.

Ein verfrühter Wechsel in die Stemmphase, bevor das Bein Bodenkontakt detektiert, führt in Kombination mit der beschriebenen Koordinationsregel zum Stillstand der Laufmaschine. Die benachbarten Beine warten auf ein Bodenkontaktsignal und verharren bis zum Ende des physischen Aktionsraums in ihren Stembewegungen. An der Grenze des physischen Aktionsraums endet die Bewegung der Stemmphase, und das Laufmuster stoppt für die beeinträchtigten Beine.

Ein verspäteter Wechsel in die Stemmphase, bei dem das Bein den Boden detektiert und nicht unmittelbar in die Stemmphase wechselt, führt bei zu großer Zeitdifferenz ebenfalls zu einer störenden Beeinflussung der Laufmusterstruktur. Das Bein erfährt im letzten Abschnitt der Schwingphase hauptsächlich durch die Gelenke β und γ eine gleichzeitige Depression und Extension - das Bein bewegt sich auf den Untergrund zu. Wird diese Bewegung des Beins nach der Detektion des Bodens weiter ausgeführt, stemmt das Bein die Laufmaschine nach oben. Wird diese Stembewegung, die noch innerhalb der Schwingphase stattfindet, nicht direkt abgebrochen, können benachbarte, stembende Beine den Bodenkontakt verlieren. Dies kann zu instabilen Situationen führen, in denen kurzzeitig zu wenige Beine Bodenkontakt haben und der Roboter zu kippen beginnt, und dadurch zu Unterbrechungen des Laufmusters beitragen.

Abbildung 5.3 zeigt einen einfachen Moore-Automaten mit zwei Zuständen. Der Automat beschreibt die Koordination zwischen der Stemm- und der Schwingphase für ein Bein. Der Automat besitzt zwei Eingaben: die Bodendetektion des Beins i und die Bodendetektion der beiden Nachbarbeine $i - 1$ und $i + 1$. Die beiden Zustände sind mit den Ausgaben „Stemmen“ und „Schwingen“ betitelt. Die Ausgaben entsprechen den charakteristischen Bewegungsabläufen der beiden Phasen.

Ist der Zustand „Stemmen“ aktiv und die Bedingung der „Bodendetektion beider Nachbarbeine“ nicht erfüllt, bleibt der Automat im Zustand „Stemmen“. Der Zustand „Stemmen“ hängt nicht von der Bedingung „Bodendetektion“ ab. Ist die Bedingung „Bodendetektion beider Nachbarbeine“ im Zustand „Stemmen“ erfüllt, wechselt der Automat in den Zustand „Schwingen“.

Der Zustand „Schwingen“ bleibt aktiv, bis die Bedingung „Bodendetektion“ erfüllt ist. Ist die Bedingung „Bodendetektion“ erfüllt, wechselt der Automat zurück in den Zustand

Eingabe: Bodendetektion, Bodendetektion beider Nachbarbeine

Ausgabe: Bewegungsablauf

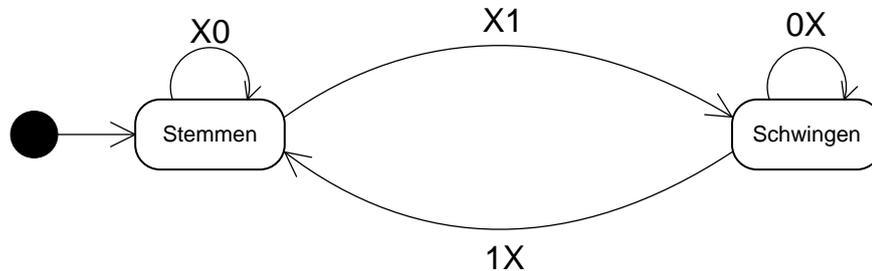


Abbildung 5.3: Moore-Automat zur Koordination der Stemm- und der Schwingphase eines Beins. Der Wert 1 entspricht einer Bodendetektion, der Wert 0 entspricht keiner Detektion des Bodens.

„Stemmen“. Der Zustand „Schwingen“ ist unabhängig von der Bedingung „Bodendetektion beider Nachbarbeine“. Dieses Konzept ergibt das alternierende Stemm-Schwing-Verhalten eines Beins, solange die Bedingungen regelmäßig erfüllt werden.

5.1.3 Laufmuster

Die Anzahl der Beine eines Läufers bestimmt die Anzahl unterschiedlicher Laufmuster, wobei ein Laufmuster durch die Anzahl der Beine mit Bodenkontakt definiert wird. Für eine sechsbeinige Laufmaschine kann zwischen drei Gangarten unterschieden werden: Pentapod, Tetrapod und Tripod. Dabei bezieht sich die jeweilige Bezeichnung auf die Anzahl der stemmenden Beine.

Die stemmenden Beine stellen Stützbeine dar, deren Fußpunkte das Stützpolygon P aufspannen. Das Stützpolygon P kann bei Höhenunterschieden in den Fußpunkten auf eine Ebene E_p mit einem Normalenvektor \vec{n} parallel zum Gravitationsvektor \vec{g} projiziert werden.

Die Projektion M' des Masseschwerpunkts M des Läufers entlang des Gravitationsvektors \vec{g} muss zur Gewährleistung der statischen Stabilität zu jedem Zeitpunkt innerhalb von P' in E_p liegen. Für P' gilt:

$$P' = \{\vec{X}'_0, \dots, \vec{X}'_n\} \text{ mit } 3 \leq |P'| \leq 6 \text{ und } n \leq 5 \quad (5.1)$$

Die Punkte \vec{X}'_i sind die Projektionen der Fußpunkte \vec{X}_i in die Ebene E_p mit i als Index für das entsprechende Bein. Für die Ebene E_p gilt folgende Normalenform:

$$E_p : \vec{n} * \vec{x} = b \text{ mit } \vec{n} \parallel \vec{g}; |\vec{n}| = 1; b = 0 \quad (5.2)$$

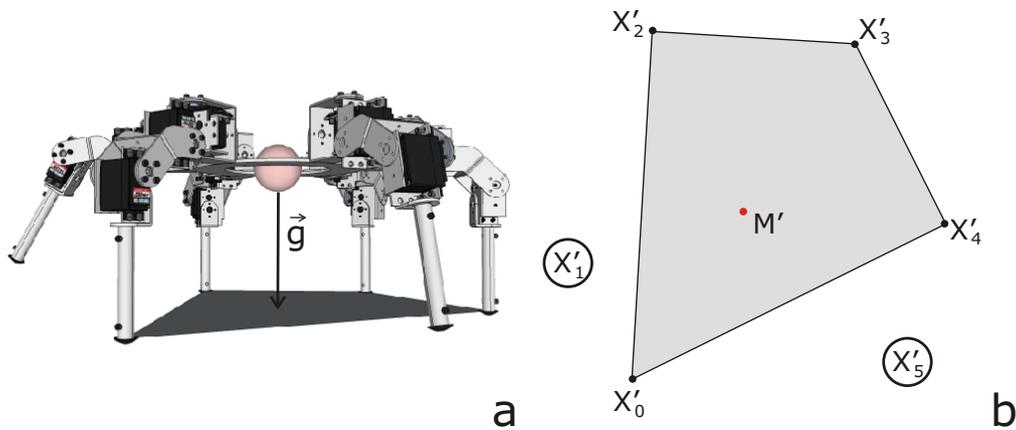


Abbildung 5.4: Stützpolygon des Roboters: a) Beispielhafte Situation mit vier Stützbeinen. Eine rote Sphäre markiert den Masseschwerpunkt. b) Schematische Darstellung des Stützpolygons aus a) mit den Fußpunkten X'_0, X'_1, X'_2 und X'_3 und dem projizierten Masseschwerpunkt M' .

Die Punkte \vec{X}'_i , die das Stützpolygon P' beschreiben, ergeben sich wie folgt:

$$\vec{X}'_i = \vec{X}_i + (b - \vec{n} \cdot \vec{X}_i) \cdot \vec{n} \quad (5.3)$$

Die Projektion des Masseschwerpunktes wird entsprechend berechnet:

$$\vec{M}' = \vec{M} + (b - \vec{n} \cdot \vec{M}) \cdot \vec{n} \quad (5.4)$$

Abbildung 5.4 a) zeigt eine exemplarische Situation, in der die Laufmaschine mit vier Beinen auf dem Untergrund steht. Die vier Fußpunkte spannen das Stützpolygon P auf. Da der Roboter auf ebenem Untergrund steht, gilt in diesem Fall $P = P'$. Eine rote Sphäre markiert den Masseschwerpunkt der Maschine. Entlang des Gewichtsvektors \vec{g} wird der Masseschwerpunkt M der Maschine auf das Stützpolygon P projiziert. Abbildung 5.4 b) zeigt das Stützpolygon mit den vier Fußpunkten X'_0, X'_1, X'_2 und X'_3 und dem projizierten Masseschwerpunkt M' in einer Draufsicht.

Damit das Stützpolygon P' die Masseschwerpunktprojektion M' umschließen kann, muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass die Fläche des Polygons größer als Null ist. Das heißt, dass die Stützbeine nicht auf einer Geraden liegen dürfen und somit zusätzlich eine Mindestanzahl von drei Stützbeinen erforderlich ist.

Diese Voraussetzungen werden durch die in Abschnitt 5.1.2 eingeführte Koordinationsregel erfüllt. Die Koordinationsregel erlaubt maximal drei Beine zu schwingen. Zusätzlich verhindert die Koordinationsregel, dass benachbarte Beine gleichzeitig schwingen.

Neben der Koordinationsregel spielt die Stemmgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle für die Generierung der Laufmuster. Da die Schwinggeschwindigkeit konstant ist, hängen

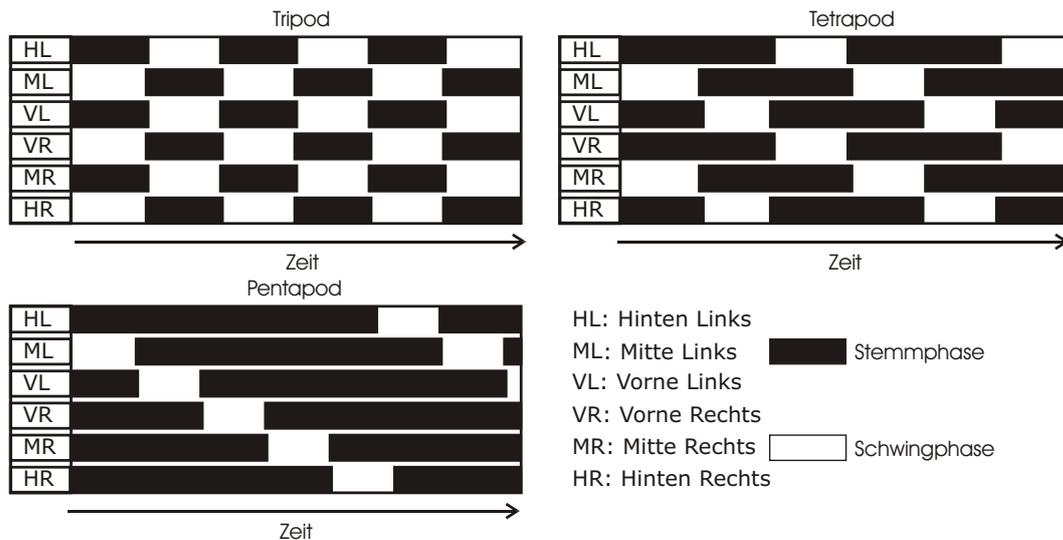


Abbildung 5.5: Mögliche Laufmuster für sechsbeiniges Laufen

die verschiedenen Laufmuster von dem Verhältnis zwischen Stemm- und Schwinggeschwindigkeit ab.

Abbildung 5.5 zeigt die drei verschiedenen Gangarten für sechsbeiniges Laufen in einem Schrittplan in idealisierter Form. Das Schrittplan stellt die Schwing- und Stemmphasen über die Zeit für die sechs Beine der Laufmaschine dar. Die Stemmphasen werden mit schwarzen Balken und die Schwingphasen mit weißen Lücken zwischen den Stemmphasen dargestellt. Die Zeit, die eine Phase benötigt, um den Fußpunkt des entsprechenden Beins von der PEP in die AEP oder umgekehrt zu bewegen, entspricht der Länge der Balken beziehungsweise der Lücken. Die Beine sind von oben nach unten mit Hinten Links (HL), Mitte Links (ML), Vorne Links (VL), Vorne Rechts (VR), Mitte Rechts (MR) und Hinten Rechts (HR) in eigenen Zeilen gekennzeichnet. Die einzelnen Diagramme sind mit den Bezeichnungen der entsprechenden Gangarten betitelt. In dem Tripod-Diagramm ist das Verhältnis der Geschwindigkeiten zwischen Stemm- und Schwingphase 1 : 1, im Tetrapod-Diagramm entspricht das Verhältnis Stemm- zu Schwinggeschwindigkeit 2 : 1 und im Pentapod 4 : 1. In der Natur können diese drei Gangarten bei Insekten beobachtet werden.

Biologische Läufer schalten nicht „hart“ zwischen den Gangarten um. Es können beim Wechsel von einer Gangart in eine andere Misch- oder Übergangsformen beobachtet werden. In einer Übergangsform kann nicht eindeutig entschieden werden, in welcher von zwei Gangarten sich der Läufer befindet.

Ein anschauliches Beispiel stellen die drei Gangarten Schritt, Trab und Galopp bei einem Pferd dar. Ein Pferd wechselt weder abrupt vom Schritt in den Trab, noch vom Trab in den Galopp. Zwischen den Gangarten können Übergänge beobachtet werden, die weder in das eine noch in das andere Schrittplan passen. Dasselbe gilt auch für die drei Schrittplan bei Insekten: Pentapod, Tetrapod und Tripod.

Es würde nicht zu dem biologischen Grundkonzept passen, drei feste Schrittmuster zu implementieren und ohne Übergangsphase zwischen den drei Mustern zu wechseln. Im Folgenden wird ein Experiment zu der hier eingeführten Steuerung vorgestellt und mit den biologischen Schrittmustern verglichen und untersucht.

5.1.3.1 Experimentelle Ergebnisse

Für die Untersuchung der Schrittmustergenerierung wird die Laufmaschine auf ebenen Untergrund gestellt. Die Beine werden in linke und rechte Beine aufgeteilt. Dazu werden die Arbeitsbereiche der α -Gelenke in Richtung der ipsilateralen Mittelbeine verschoben. Die α -Gelenke befinden sich in zufällig gewählten Initialpositionen innerhalb ihrer Arbeitsbereiche. Das dezentrale Laufverhalten, basierend auf den Stemm-Schwing-Rhythmen der Beine und den lokalen Koordinationsregeln, wird gestartet. Dabei beträgt das Verhältnis zwischen Stemm- und Schwinggeschwindigkeit 4 : 1. Die Geschwindigkeit der Stemmphase wird über einen Zeitraum von 4,5 Minuten kontinuierlich erhöht, bis ein Geschwindigkeitsverhältnis von 1 : 1 erreicht ist. Während des gesamten Laufs wird für jedes Bein aufgezeichnet, in welcher Phase es sich aktuell befindet. Abbildung 5.6 zeigt das Ergeb-

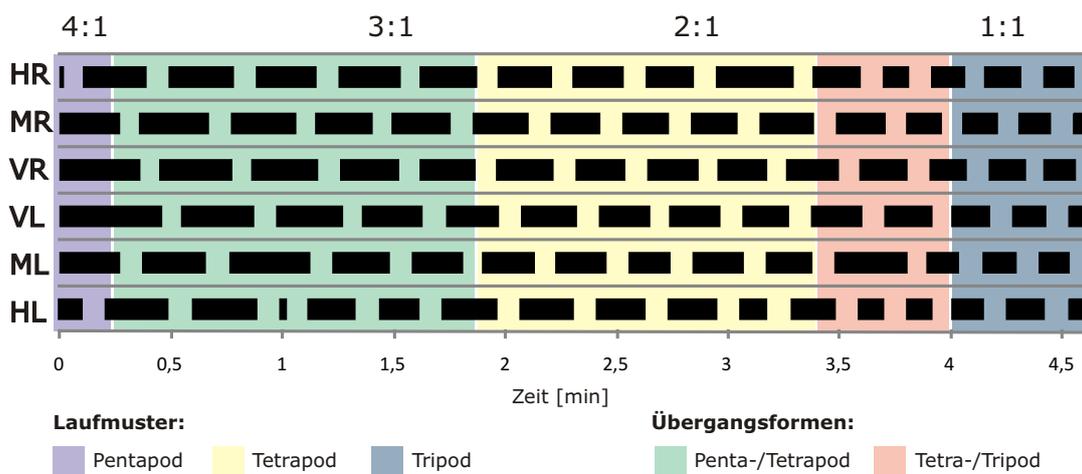


Abbildung 5.6: Schrittmusterdiagramm. Das Verhältnis für die Stemm-Schwing-Geschwindigkeit ist oben angegeben. Die Stemmphasen sind in schwarz eingezeichnet. Verschiedene Schrittmuster und Übergänge sind farblich markiert.

nis des Experiments in einem Schrittmusterdiagramm. Das Schrittmusterdiagramm zeigt die Phasen für jedes Bein in einer Zeile über die Zeit. Dabei sind die Stemmphasen als schwarze Balken und die Schwingphasen als weiße Lücken zwischen den Balken kodiert. Die Zeilen sind mit den Bezeichnungen für die einzelnen Beine von oben nach unten mit Hinten Rechts (HR), Mitte Rechts (MR), Vorne Rechts (VR), Vorne Links (VL), Mitte

Links (ML) und Hinten Links (HL) beschriftet. Über dem Diagramm sind die Geschwindigkeitsverhältnisse Stemmgeschwindigkeit zu Schwinggeschwindigkeit angegeben.

Zu Beginn der Aufzeichnung entspricht das Geschwindigkeitsverhältnis zwischen Stemm- und Schwingphase 4 : 1. Im weiteren Verlauf werden die Stemmphasen kontinuierlich kürzer. Das Geschwindigkeitsverhältnis ändert sich auf 3 : 1 nach 1,5 Minuten und nach etwa drei Minuten auf ein Verhältnis von 2 : 1. Die Stemmgeschwindigkeit erhöht sich bis zu Minute 4,5, wo ein Geschwindigkeitsverhältnis von 1 : 1 erreicht wird.

Die drei Schrittmuster Pentapod, Tetrapod und Tripod sind in dem Schrittmusterdiagramm zu den entsprechenden Stemm-Schwing-Geschwindigkeitsverhältnissen 4 : 1, 2 : 1 und 1 : 1 zu erkennen. Das Schrittmuster Pentapod ist hier mit einem blassen Violett hinterlegt, der Tetrapod mit einem blassen Gelb und der Tripod mit einem blassen Blau. Zwischen dem Pentapod und dem Tetrapod ist die Übergangsform mit blassem Grün hinterlegt. Der Übergang von Tetrapod zu Tripod ist mit blassem Orange hinterlegt.

In dem Schrittmusterdiagramm ist zu erkennen, dass die drei Gangarten Pentapod, Tetrapod und Tripod und auch die Übergangsformen von der dezentralen Laufsteuerung generiert werden. In der Übergangsform Pentapod/Tetrapod wechselt die Anzahl der stemmenden Beine zwischen fünf und vier. Es stemmen zum Beispiel vor Minute 1,8 vier Beine, bei Minute 1,8 nochmals fünf Beine; hier schwingt nur das Bein Vorne Links (VL), und dann wieder vier Beine. Entsprechendes gilt für den Übergang Tetrapod/Tripod.

Es fällt auf, dass die Stemmphase zum Teil wieder länger zu werden scheint. Zwischen Minute 3,0 und 3,5 gilt dies für das Bein Hinten Rechts (HR). Von Minute 3,5 bis 3,8 ist dies bei dem linken Mittelbein (ML) zu sehen. Dieser Effekt kann durch die Koordinationsregel erklärt werden. Solange sich nicht beide Nachbarbeine in der Stemmphase befinden, darf das entsprechende Bein nicht in die Schwingphase wechseln und die Stemmphase verlängert sich.

Teile dieser Ergebnisse wurden bereits 2006 veröffentlicht [36]. Eine weitere Arbeit über Laufmuster, die im Rahmen des ORCA-Projekts entstanden ist, wurde 2010 veröffentlicht [70].

Das Ergebnis zeigt, dass durch die dezentrale Laufsteuerung und eine kontinuierliche Steigerung der Stemmgeschwindigkeit die Laufmaschine von der langsamsten Gangart Pentapod über eine Übergangsform in den Tetrapod und nach einer weiteren Übergangsform in den Tripod wechselt. Die drei Gangarten können ohne eine explizite Implementierung des Schrittmusters generiert werden und entstehen durch das Verhältnis von Stemm- und Schwinggeschwindigkeit emergent.

5.2 Kurvenlaufen

Der Kurvenlauf kann durch ein ausgewähltes Repertoire von verschiedenen engen Kurven fest in eine Laufmaschine implementiert werden. Kurvenläufe mit einer vordefinierten Anzahl verschiedener Kurvenradien und das Drehen um die eigene Körperhochachse sind einfach umzusetzen. Die genauere Untersuchung von Kurvenlaufen bei Stabheuschrecken zeigt al-

lerdings, dass die Anwendung einer vordefinierten Anzahl an Kurvenläufen bei biologischen Organismen äußerst unwahrscheinlich ist [28, 53].

In diesem Abschnitt wird ein Konzept vorgestellt, mit dem ein kontinuierlicher Übergang vom Geradeauslaufen über einen Kurvenlauf mit zunehmender Steilheit bis hin zum Drehen um die eigene Hochachse erreicht wird. Hierzu wird der Abstand zwischen den zwei Extrempositionen PEP und AEP von drei Beinen einer Körperseite kontinuierlich verändert.

5.2.1 Konzept

Da die Trajektorien von Schwing- und Stemmphase jedes Beins wie oben beschrieben durch AEP und PEP begrenzt werden, können durch Verschieben der beiden Extrempositionen die Stemm- und somit auch die Schwingbewegung verkürzt und verlängert werden. Für einen einfachen Ansatz des Kurvenlaufens kann die Distanz zwischen den Extrempositionen der Beine auf der Innenseite der gewünschten Kurve verkürzt werden. Dadurch werden sowohl die Stemm- als auch die Schwingphase verkürzt. Durch die kürzere Stembewegung auf einer Körperseite des Läufers wird auf der entsprechenden Körperseite weniger Vortrieb erzeugt, und der Läufer wechselt von einem Geradeauslauf in einen Kurvenlauf. Dabei befinden sich die Beine mit kürzerer Stemmphase auf der Kurveninnenseite. Die in Abschnitt 5.1.2 vorgestellte Koordinationsregel gilt dabei weiterhin.

Dieser Ansatz für das Kurvenlaufen ist vergleichbar mit der Kurvenfahrt einer Maschine mit zwei differential angetriebenen Rädern oder Ketten. Auch bei diesen Konzepten wird durch verschiedene Vortriebe, hier durch den Einsatz unterschiedlicher Geschwindigkeiten, eine Kurvenfahrt erzeugt.

Durch kontinuierliches Verschieben der Extrempositionen kann ein fließender Übergang von einem Geradeauslauf über einen immer enger werdenden Kurvenlauf bis hin zum Drehen auf der Stelle erreicht werden.

Wird zum Beispiel, ausgehend von einem Geradeauslauf, der Abstand der Extrempositionen der linken Beine kontinuierlich verkürzt, indem die Extrempositionen aufeinander zu bewegt werden, führt dies zu einem Linkskurvenlauf. Werden die Extrempositionen soweit aufeinander zugeführt, dass AEP und PEP denselben Punkt definieren, treten die linken Beine auf der Stelle. Die Schwingphase der Beine besteht in diesem Fall nur aus Levation und Flexion sowie Depression und Extension in den β - und γ -Gelenken der Beine. Der Winkelwert des α -Gelenks bleibt konstant. Eine Protraktion wird nicht ausgeführt. In der Stemmphase üben die linken Stützbeine keinen Vortrieb auf den Läufer mehr aus. Werden die Extrempositionen in dieselbe Richtung wie bisher weiter verschoben, entfernen sie sich wieder von einander, allerdings in entgegengesetzte Richtung. Die Extrempositionen der linken Beine sind dann vertauscht, und das Bein schwingt und stemmt entgegengesetzt zur Ursprungsbewegung. Werden die AEP und PEP weiter verschoben, bis der Betrag ihres Abstands dem Betrag ihres ursprünglichen Abstandes und somit auch dem Abstand zwischen AEP und PEP der rechten Beine entspricht, bewegen sich die linken Beine genau entgegengesetzt zu den rechten Beinen, und der Läufer dreht sich um seine Hochachse [37].

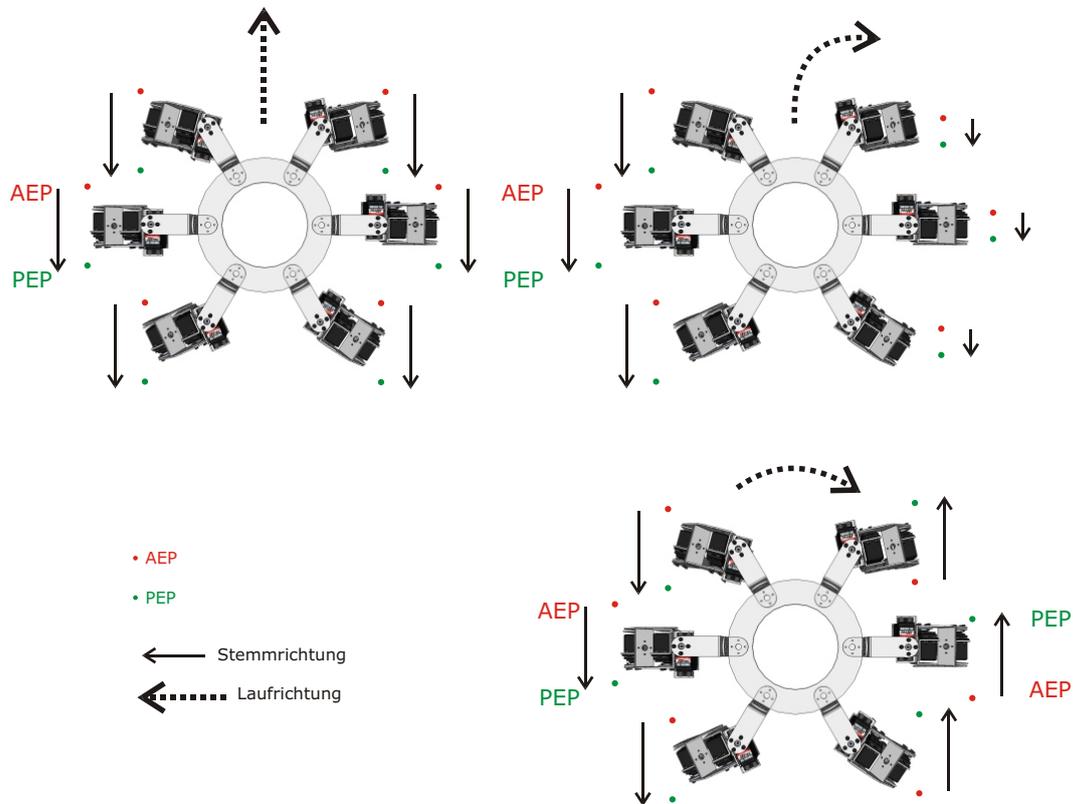


Abbildung 5.7: Zusammenhänge zwischen der AEP-PEP-Distanz, der Stemmrichtung der Beine und der Laufrichtung der Maschine. Die AEP wird durch einen roten, die PEP durch einen grünen Punkt markiert. Die Stemmrichtungen und Stemmlängen werden durch einen schwarzen Pfeil, die Laufrichtung durch einen gepunkteten Pfeil angegeben.

Die Abbildung 5.7 skizziert die Zusammenhänge zwischen der Verschiebung von AEP und PEP, den Stemmrichtungen der Beine und der Laufrichtung der Maschine. Es sind drei Draufsichten der Laufmaschine abgebildet. An jedem Bein ist der Abstand zwischen AEP und PEP abgebildet. Die AEP wird mit einem roten und die PEP mit einem grünen Punkt markiert. Zwischen den beiden Extrempositionen gibt ein schwarzer Pfeil die Länge und die Richtung der jeweiligen Stemmphase an. Ein Pfeil mit gepunkteter Linie gibt die resultierende Laufrichtung der Maschine an.

5.2.2 Lokale Kommunikation

Die im Abschnitt 3.3.1 eingeführte lokale Kommunikation zwischen benachbarten Beinen spielt neben der Koordination der Beine hier eine weitere wichtige Rolle. Der AEP Zielmechanismus des Mittel- und des Hinterbeins bei der Stabheuschrecke *Carausius Morosus*

wird beim Laufen durch das ipsilaterale Vorderbein beeinflusst [18]. Auch im Kurvenlauf wirkt sich bei *Carausius Morosus* eine Änderung in der Stemmphase der Vorderbeine auf die Mittel- und Hinterbeine aus [26].

Angelehnt an die oben genannten biologischen Ergebnisse wird auch in dem hier umgesetzten Konzept zum sechsbeinigen Kurvenlaufen eine Änderung der Vorderbeinstemphasen als Auslöser für die ipsilateralen Nachbarbeine eingeführt. Das Kurvenlaufen wird in diesem Fall durch eine BCU gesteuert, die eine Verschiebung der Extrempositionen an das entsprechende Vorderbein sendet. Auslöser für das Kurvenlaufen können das aktivierte Verhalten wie zum Beispiel das Ausweichen vor einem Hindernis oder das Ausrichten auf ein Ziel während des Laufens sein. Abhängig von dem auslösenden Reiz wird die Distanz

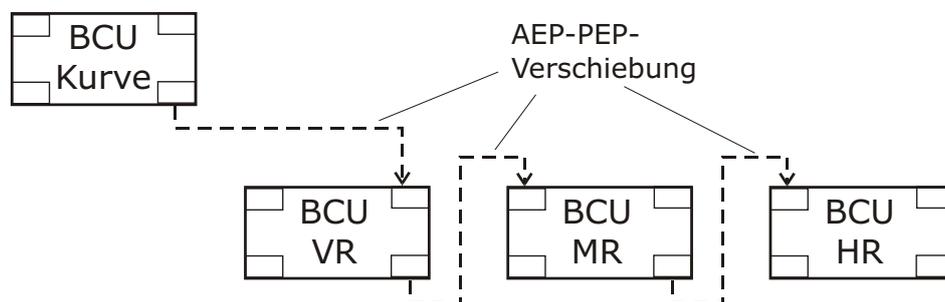


Abbildung 5.8: Informationsfluss zwischen der Kurven-BCU und drei Bein-BCU einer Körperseite: Vorne Rechts (VR), Mitte Rechts (MR) und Hinten Rechts (HR)

zwischen den Extrempositionen eines Vorderbeins verkürzt. Durch die lokale Kommunikation der Bein-BCUs wird die Information über die Modifikation der Extrempositionen im Vorderbein an das benachbarte ipsilaterale Mittelbein übermittelt. Das Mittelbein passt seine eigenen Extrempositionen an und reicht ebenfalls über die lokale Kommunikation seine Parameter für PEP und AEP an das ipsilateral benachbarte Hinterbein weiter. Auch dieses passt seine PEP und AEP an. Eine weitere Änderung der Extrempositionen wird auf demselben Weg vom Vorderbein über das Mittel- zum Hinterbein kommuniziert.

5.3 Adaptives Laufen

Die bis hier beschriebenen Konzepte beschränken sich auf das Geradeaus- und Kurvenlaufen auf ebenem Untergrund. Bereits die Steuerung des Einzelbeins und die Frage nach der räumlichen und zeitlichen Koordination der Beine untereinander zur Erzeugung eines auf sechs Beinen basierenden Laufmusters auf ebenem Untergrund ist eine diffizile Fragestellung. Die Synthese des Laufens in natürlichen Umgebungen, wie es biologische Systeme beherrschen, ist jedoch eine noch reizvollere und gleichzeitig weit komplexere Herausforderung an die Laufsteuerung und ihre adaptiven Fähigkeiten.

Natürliches Gelände reicht von relativ ebenem über völlig zerklüftetem bis hin zu extrem hindernisreichem und unzugänglichem Untergrund. Für eine solch unbegrenzte Diversität

an denkbaren Umgebungen gibt es keine Standardlaufmuster. Die große Anzahl möglicher Schrittsituationen beziehungsweise Beinstellungen eines sechsbeinigen Läufers wird durch die Unterbestimmtheit des Systems in ihrer Kontrollierbarkeit zusätzlich erschwert. Unter diesen Bedingungen zeigt sich das volle Spektrum der eindrucksvollen Flexibilität biologischer Systeme und ihrer motorischen Intelligenz.

Laufende biologische Systeme passen ihre Bewegungen an nahezu jede beliebige Situation an. Ein Standardverhalten, basierend auf einem vorprogrammierten Bewegungsmuster zur Bewältigung verschiedener Situationen, scheint es nicht zu geben. Diese erstaunliche Adaption der Insekten an die aktuelle Situation scheint auf der dezentralen Koordination der sechs Beine zu basieren. Durch die lokalen Regeln und die daraus resultierende Selbstorganisation der Schrittmuster sind biologische Systeme extrem anpassungsfähig.

Die in 5.1 vorgestellte Laufsteuerung basiert auf einem vereinfachten Konzept, das noch keine zusätzlichen Reflexe und problemlösenden Bewegungsmuster in die Steuerung integriert. Die Konzepte und die Implementierung dieser situationsabhängigen Reflexe und stereotypen Bewegungsmuster sowie die Kombination aus beiden werden im Folgenden erläutert.

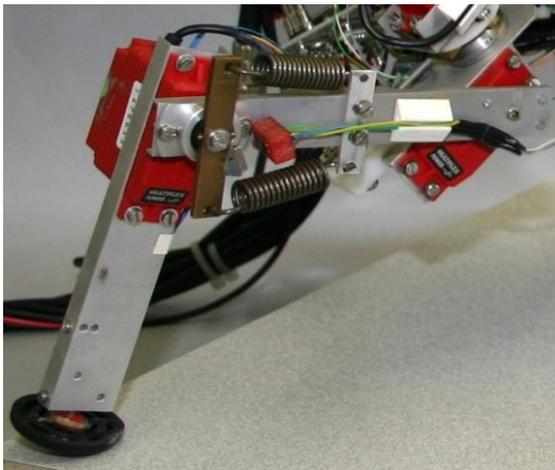
5.3.1 Reflexe

Ein Reflex ist eine schnelle, gleichförmige Reaktion auf einen definierten Stimulus. Reflexe können sowohl angeboren als auch erworben sein. Die stereotypen Reaktionen sind angepasst an den jeweilig auslösenden Reiz. Dieser Abschnitt beschränkt sich auf Stimuli, die eine Störung des Bewegungsablaufs signalisieren. Ein Beispiel dafür ist der menschliche Patellarsehnenreflex. Der auslösende Stimulus wird durch einen Dehnungsrezeptor wahrgenommen. Als Reflexantwort wird der Quadriceps im Oberschenkel kontrahiert und somit das Bein gestreckt. Der Patellarsehnenreflex ist Teil der Regelung des Haltetonus in der Stützmotorik und trägt zum aufrechten Stehen und zum in die Knie gehen bei. Auch beim Stolpern wird der Patellarsehnenreflex durch eine Dehnung des Quadriceps ausgelöst und kann einen Sturz durch die Streckung des Beins und den resultierenden Ausfallschritt verhindern.

Im Folgenden werden Reflexe mit Reaktionen in unterschiedlicher Komplexität vorgestellt, die in dieser Arbeit auf der Laufmaschine implementiert und evaluiert werden. Die Komplexität der Reflexe wird dabei durch die Anzahl der an der Reaktion beteiligten Aktoren oder durch die Anzahl der an den Stimuli erzeugenden Sensoren definiert. Es werden fünf Reflexe vorgestellt: der Nachgiebigkeitsreflex, der Schrittreflex, der Bodendetektionsreflex, der Suchreflex und der Levatorreflex. Der Nachgiebigkeitsreflex wird von einem Gelenk ausgeführt. Schritt-, Bodendetektions-, Such- und Levatorreflex aktivieren für die Reaktion ein Bein mit seinen drei Gelenken.

5.3.2 Gelenknachgiebigkeit

Ein Großteil der motorischen Intelligenz biologischer Organismen ist ihren anatomischen Charakteristika zuzuschreiben und basiert zum einen auf der Geometrie und den Propor-



(a) Feder-Servomotor-Kombination (Tarry IIb)



entspannter Schlauch
ohne inneren Luftdruck



durch inneren Luftdruck
kontrahierter Schlauch

(b) Pneumatischer Muskel

Abbildung 5.9: Beispiele für passiv elastische Gelenke. a) Kombination aus Motor und Federn: Motor bewegt Segment über eine elastische Federkonstruktion. (©J.Schmitz und A.Schneider) b) Pneumatischer Muskel aus elastischem Schlauch: oben entspannt, unten durch Luftdruck im Schlauch kontrahiert.

tionen des Bewegungsapparats, welche optimal auf das jeweilige Bewegungsmuster zugeschnitten sind, und zum anderen auf dem Zusammenspiel der Steifigkeit und der Elastizität von Muskeln, Sehnen und Gelenken. Letzterem kommt mindestens eine genau so große Bedeutung zu wie der Steuerung, wurde aber lange Zeit völlig außer Acht gelassen. Je tiefer die Wissenschaft in die Zusammenhänge biologischer Lokomotion vordringt, desto größer wird die Bedeutung der anatomischen Eigenschaften. Die Elastizität der Muskeln scheint eine wichtige Rolle für die Stabilitätssicherung des Laufens zu spielen. Darüber hinaus kompensiert die Muskelelastizität extern und intern erzeugte Kräfte, die auf den Körper des Läufers wirken. Wenn die Fußaufsatzpunkte einer sechsbeinigen Laufmaschine und die entsprechenden Gelenkstellungen nicht exakt berechnet werden, entstehen schnell Scherkräfte, die auf das Skelett der Maschine wirken und unnötig Energie verbrauchen. Befinden sich zum Beispiel die sechs Beine am Boden, entspricht dies einer geschlossenen kinematischen Kette mit 18 Freiheitsgraden. Die exakte Berechnung aller Gelenkstellungen für solch eine Situation ist sehr rechenaufwändig. Biologische Organismen scheinen diese Situationen jedoch ohne große Mühe zu meistern und auftretende Scherkräfte zu kompensieren. Dies scheint unter anderem durch die Muskelelastizität erreicht zu werden.

In der Robotik werden zur Ausstattung der Aktuatoren mit elastischen Eigenschaften verschiedene Ansätze verfolgt, wobei zwischen passiven und aktiven Elastizitätseigenschaften unterschieden wird. Die passive Elastizität wird in der Regel durch den Einsatz von Motor-Feder-Kombinationen oder durch pneumatische Muskeln erzeugt. Die aktive Elastizität wird durch das Zusammenspiel von Kraftmessung und aktiver Nachregelung des Motors erreicht. Bei der Motor-Feder-Kombination steuert ein Motor als Aktuator ein

Segment über eine elastische Federkonstruktion. Die Federn dämpfen Stöße ab und ergänzen das Gelenk um die passive Elastizität. Abbildung 5.9(a) zeigt ein Beispiel für diese Konstruktion. Das Foto zeigt ein Gelenk der sechsbeinigen Laufmaschine Tarry IIb [109] mit kombiniertem Einsatz aus Motor und Feder.

In weiteren Varianten werden zusätzliche Servomotoren genutzt, um die eingesetzten Federn zu spannen oder zu entspannen und somit die Steifigkeit beziehungsweise die Elastizität zu variieren. Als pneumatische Muskeln werden luftgefüllte, elastische Gummischläuche bezeichnet, die sich durch die Erhöhung des inneren Luftdrucks, ähnlich wie bei einer Muskelkontraktion, zusammenziehen. Abbildung 5.9(b) zeigt eine schematische Darstellung eines entspannten pneumatischen Muskels (oben) und eines mit Luft gefüllten, kontrahierten Muskels (unten). Die Dehnbarkeit der Gummischläuche verleiht dem pneumatischen Muskel eine passive Elastizität.

Die passive Elastizität wird durch den Einsatz von Werkstoffen oder Federn mit elastischen Eigenschaften erreicht. Die elastische Eigenschaft kann als reversible Reaktion auf eine Kraft definiert werden. Die aktive Elastizität basiert auf dem Einsatz von Regelungstechnik und entspricht genau genommen keiner elastischen Eigenschaft. Im Folgenden wird daher von aktiver Nachgiebigkeit gesprochen.

Die aktive Nachgiebigkeit entspricht einer positiven Rückkopplung. Wirkt eine Kraft auf ein Gelenk, so wird dieser Kraft unter vordefinierten Bedingungen durch aktive Regelung des Motors nachgegeben. In dieser Arbeit wird die positive Rückkopplung zur Realisierung der Nachgiebigkeit eingesetzt.

Die Einführung einer positiven Rückkopplung in die Robotergelenke [106, 114] als Analogie zu der Muskelelastizität konnte bereits erfolgreich in der Walknet-Simulation [22, 30] gezeigt werden und verspricht eine Verbesserung der Laufsteuerung. Auch im DLR-Crawler wurde bereits die positive Rückkopplung in den Gelenken zur Verbesserung des Laufens implementiert [49].

5.3.2.1 Konzept

Anders als bei der passiven Elastizität müssen für die aktive Nachgiebigkeit Sensordaten aufgenommen und ausgewertet werden. Anschließend müssen Kriterien definiert werden, die eine Reaktion auslösen. Bei dem hier eingesetzten Konzept wird der Stromverbrauch eines Servomotors gemessen, um eine extern auf das Gelenk wirkende Kraft zu detektieren. Überschreitet diese Kraft einen vordefinierten Schwellwert, wird der Servomotor so gesteuert, dass er der wirkenden Kraft nachgibt. Die Detektion einer Kraft entspricht somit dem Reiz, und das aktive Nachgeben des Gelenks entspricht der Reaktion. Der Stromverbrauch des Servomotors ist abhängig von der aktuellen Aktivität des Motors. In Abbildung 5.10(a) ist der proportionale Zusammenhang zwischen wirkender Kraft, gemessen in Newton (N), und dem Stromverbrauch der eingesetzten Servomotoren in % vom maximalen Stromverbrauch aufgetragen. Ein unbelasteter Servomotor, der eine Winkelstellung hält, zeichnet sich durch einen sehr geringen Stromverbrauch aus. Der Stromverbrauch steigt in der gehaltenen Position mit der Kraft, die der Servomotor aufbringen muss, um die Position zu halten. Die Kraft, die der Servomotor aufbringen muss, entspricht der detek-

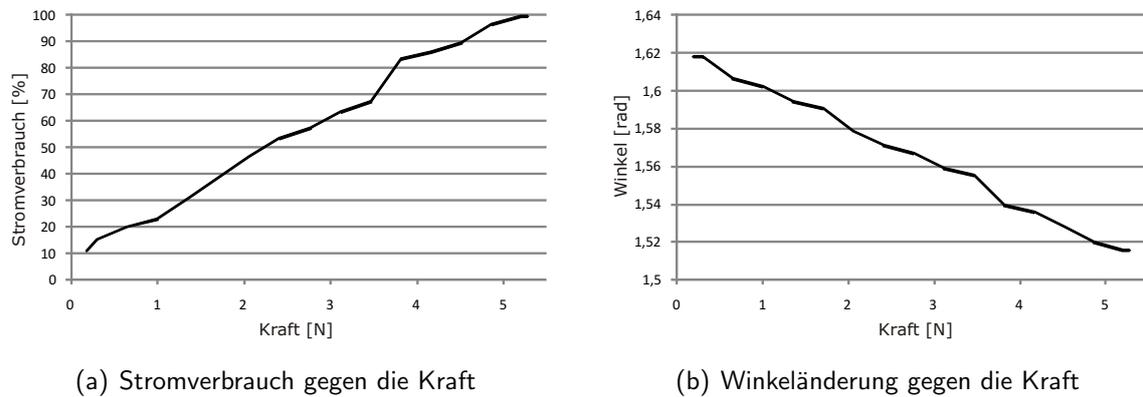


Abbildung 5.10: Zusammenhang von wirkender Kraft, Strom und Winkeländerung. a) Stromverbrauch in % vom maximalen Stromverbrauch gegen eine wirkende Kraft [N]. b) Winkel gegen eine wirkende Kraft [N]

tierten, entgegengerichteten Kraft. Der proportionale Zusammenhang zwischen Kraft und Stromverbrauch erleichtert die Auswertung der messbaren Signale, da repräsentativ für die wirkende Kraft der aktuelle Stromverbrauch des Servomotors ausgewertet werden kann.

Der auslösende Stimulus für den Gelenkreflex kann demnach durch einen zu überschreitenden Schwellwert im Stromverbrauch definiert werden. Zusätzlich zu einem vordefinierten Schwellwert ist die Richtungsbestimmung der Kraft notwendig, damit als Reaktion der Gegenkraft nachgegeben werden kann. Abbildung 5.10(b) zeigt die Winkelstellung des Servomotors im Bogenmaß gegen die wirkende Kraft. Die signifikante Positionsabweichung des Servomotors bei steigender Kraft kann zur notwendigen Richtungsbestimmung für die wirkende Gegenkraft ausgenutzt werden.

Mit dem definierten Stimulus und der zusätzlichen Richtungsinformation kann ein einfacher Algorithmus zur Gelenknachgiebigkeit implementiert werden. Die Reaktion des Servomotors entspricht einer Positionskorrektur um die gemessene Positionsdifferenz. Die Algorithmen wurden in der Arbeit von Dudek implementiert und untersucht [31].

5.3.2.2 Implementierung

Der Nachgiebigkeitsreflex in jedem Gelenk wird in einer BCU implementiert. Dabei besitzt jedes Gelenk eine eigene BCU für die Reflexausführung. Die BCU misst die auf das Gelenk wirkende Kraft und entscheidet zwischen einer steifen oder elastischen Gelenkreaktion, wobei die elastische Gelenkreaktion als aktive Nachgiebigkeit implementiert ist. Dabei wird die Nachgiebigkeit des Gelenks nur in einem vordefinierten Arbeitsbereich erlaubt. Die extern wirkende Kraft wird durch den aktuellen Stromverbrauch des Servomotors gemessen. Überschreitet der Stromverbrauch einen vordefinierten Schwellwert, wird die Nachgiebigkeit des Gelenks ausgelöst. Die aktive Nachgiebigkeit ist als einfacher Regelkreis implementiert, der den neuen Zielwinkel ω des Gelenks g mit $g \in \{\alpha, \beta, \gamma\}$, zum nächsten Zeitpunkt $t + 1$ ($\omega_{g,t+1}$) abhängig von dem Soll- und Ist-Winkel des Gelenks zum Zeitpunkt

t bestimmt. Die Summe aus der signifikanten Gelenkwinkeldifferenz zwischen aktueller Soll- und Ist-Winkelstellung $\Delta\omega_{g,t}$ und dem Gelenkwinkel zum Zeitpunkt t $\omega_{z,t}$ ergibt die neue Gelenkwinkelposition zum Zeitpunkt $t + 1$ $\omega_{z,t+1}$. Wenn die externe Kraft das Gelenk davon abhält, die Zielposition zu erreichen, wird die resultierende Winkeldifferenz also aktiv korrigiert. Der Regelkreis bewirkt somit eine positive Rückkopplung, die den Gelenkwinkel aktiv zu seinem aktuellen realen Winkel korrigiert.

$$\omega_{g,t+1} = \omega_{z,t} + \Delta\omega_{z,t} \quad (5.5)$$

Abhängig von der Position des Gelenks im Bein, wird jedem Gelenk ein eigener vordefinierter Schwellwert zugewiesen. Die eigenen Schwellwerte sind mit den unterschiedlichen Kräften begründet, die auf die Gelenke α , β und γ wirken. Mit Überschreiten des vordefinierten Schwellwerts im Stromverbrauch des Servomotors wird zum einen die aktive Nachgiebigkeit ausgelöst und zum anderen der aktuelle Gelenkwinkel als Initialposition $\omega_{z,0}$ gespeichert. Solange der Stromverbrauch des Servomotors den vordefinierten Schwellwert überschreitet, ist der Regelkreis für die aktive Nachgiebigkeit aktiviert. Ob das Gelenk nachgibt oder nicht, wird von der Entscheidungsfunktion $E(S_{g,t})$ entschieden. Die Entscheidung hängt von der normalisierten Stromverbrauchsmessung $S_{g,t}$ ab. Der Schwellwert ist mit dem Wert 1 definiert. Ein Ergebnis der Messung mit $S_{g,t} > 1$ löst die Nachgiebigkeit aus. Die Entscheidungsfunktion E wird zyklisch aufgerufen und ist eine Abbildung von der normalisierten Strommessung auf einen Gelenkwinkel.

$$E(S_{g,t}) = \begin{cases} \omega_{g,t+1} = \omega_{g,t} + \Delta\omega_{g,t} & : S_{g,t} > 1 \\ \omega_{g,t+1} = \omega_{g,0} & : S_{g,t} \leq 1 \end{cases} \quad (5.6)$$

Sobald der Stromverbrauch des Servomotors den Schwellwert unterschreitet, aktualisiert die Entscheidungsfunktion den Gelenkwinkel auf den gespeicherten Initialwinkel $\omega_{g,0}$. Wird der Initialwert nicht erreicht und die Überschreitung des Schwellwertes erneut detektiert, setzt die Gelenknachgiebigkeit wieder ein. Alternativ zu der direkten Bewegung in die gespeicherte Initialposition könnte auch ein schrittweises Zurückbewegen in die Initialposition implementiert werden. Diese Alternative führt zu demselben Ergebnis, nimmt allerdings mehr Zeit in Anspruch und wurde aus diesem Grund nicht implementiert. Die Funktionalität des hier vorgestellten Konzepts wird im folgenden Abschnitt experimentell untersucht und ausgewertet.

5.3.2.3 Experimentelle Ergebnisse

Der hier beschriebene Ansatz für die aktive Nachgiebigkeit wurde in mehreren Experimenten evaluiert und untersucht. Die aktive Nachgiebigkeit als Reaktion auf eine extern wirkende Kraft wurde in den drei Gelenken α , β und γ separat getestet. Im Folgenden wird das Experiment und die Auswertung für die aktive Nachgiebigkeit und das Zurückbewegen in die Initialposition für ein einzelnes α -Gelenk beschrieben.

Für den Test befindet sich das α -Gelenk in seiner Mittelstellung. Die Mittelstellung ist in diesem Experiment bei 0 definiert. Der vordefinierte maximale Arbeitsbereich beträgt

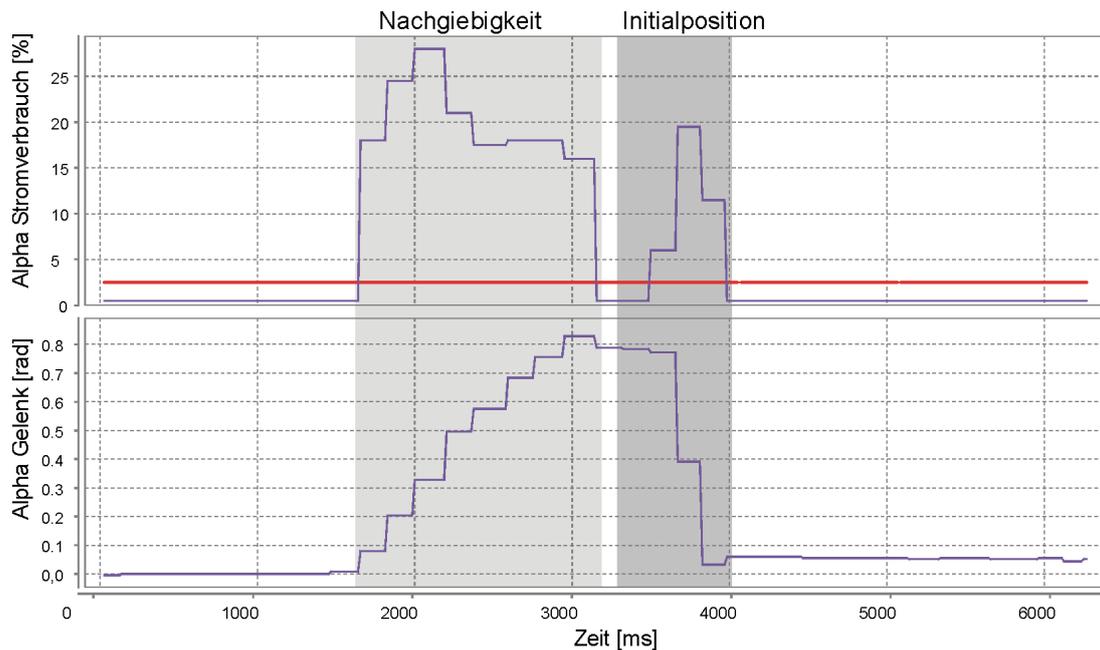


Abbildung 5.11: Nachgiebigkeitsreflex als Reaktion auf extern wirkende Kraft. Oberer Teil: Stromverbrauch des α -Gelenks in % über die Zeit. Der vordefinierte Schwellwert für den Stromverbrauch in Rot liegt bei 2,5 %. Unterer Teil: Der Winkel des α -Gelenks über die Zeit.

$\pm \frac{\pi}{4}$. Eine externe Kraft, die zu der Überschreitung des vordefinierten Schwellwertes im Stromverbrauch des Servomotors führt, wird manuell für etwa eine Sekunde auf das α -Gelenk ausgeübt und soll den Nachgiebigkeitsreflex auslösen. Nach etwa einer Sekunde wird die Kraft aufgehoben. Sobald die externe Kraft nicht mehr wirkt, soll das α -Gelenk wieder in seine Initialposition bewegt werden.

Das Ziel des Experiments besteht darin, die Funktionalität der Nachgiebigkeit als Reaktion auf eine externe Kraft und der Bewegung zurück in die Initialposition zu überprüfen. Dafür wird der Roboter auf einen Sockel platziert und ein Bein in seine Mittelstellung bewegt. Das Bein wird dann für ca. eine Sekunde manuell in eine Richtung gedrückt. Überschreitet der Stromverbrauch in dem betroffenen Gelenk seinen vordefinierten Schwellwert, sollte die Nachgiebigkeit ausgelöst werden. Sobald keine Kraft mehr auf das Gelenk wirkt, sollte das Gelenk zurück in seine Initialposition bewegt werden.

In Abbildung 5.11 ist das Ergebnis der Messungen abgebildet. Im oberen Teil der Abbildung ist der Stromverbrauch des α -Gelenks in Prozent von dem maximalen Stromverbrauch des Servomotors über die Zeit in Millisekunden abgetragen. In Rot ist der vordefinierte Schwellwert für den Stromverbrauch bei 2,5 % eingezeichnet. Im unteren Teil der Abbildung 5.11 ist der Winkel des α -Gelenks in Radiant über die Zeit aufgetragen. Zwei grau gekennzeichnete Bereiche markieren die Nachgiebigkeitsreaktion (hellgrau) und die Bewegung zurück in die Initialposition (dunkelgrau).

Bei etwa 1600 ms überschreitet der Stromverbrauch des α -Gelenks den vordefinierten Schwellwert von $2,5\%$. Kurz darauf kann in der Winkelkurve eine Winkelkorrektur abgelesen werden. Der Stromverbrauch steigt weiter an und die Winkelwerte werden kontinuierlich korrigiert. Von 2000 ms bis 3200 ms sinkt der Stromverbrauch wieder ab, bleibt allerdings oberhalb des definierten Schwellwerts. Während dieser Zeitspanne wird der Winkel durchgehend korrigiert. Bei 3200 ms unterschreitet der Stromverbrauch den Schwellwert. Darauf wird das α -Gelenk zurück in seine Initialposition bewegt. Während des Zurückbewegens steigt der Stromverbrauch des α -Gelenks wieder an.

5.3.2.4 Auswertung

Aus dem hier beschriebenen Kurvenverlauf des Stromverbrauchs und der Winkel des α -Gelenks über die Zeit kann sowohl die Nachgiebigkeitsreaktion als auch das Zurückbewegen in die Initialposition abgelesen werden. Mit Überschreiten des Schwellwerts für den Stromverbrauch ändert sich auch die Winkelposition. Durch die Überschreitung des Schwellwerts wird eine extern wirkende Kraft detektiert. Die Richtung der wirkenden Kraft kann aus der Richtung der Winkeländerung abgeleitet werden. Als Reaktion wird die Winkelposition so lange aktualisiert, bis der Stromverbrauch des Gelenks den definierten Schwellwert unterschreitet und somit keine Kraft mehr detektiert wird. Diese Reaktion entspricht der hier beschriebenen Nachgiebigkeitsreaktion und ist in Abbildung 5.11 Hellgrau hinterlegt.

Nach Unterschreiten des Schwellwertes wird das Ansteuern der Initialposition aktiviert. In dem dunkelgrau hinterlegten Bereich kann abgelesen werden, dass sich das Gelenk wieder in seine ursprüngliche Position, die Initialposition, zurück bewegt. Für die Bewegung verbraucht das Gelenk mehr Strom als in der Ruheposition. Der Stromverbrauch steigt wieder an. Während der Bewegung des Gelenks zurück in die Initialposition wird der Stromverbrauch nicht ausgewertet.

Durch den hier beschriebenen Nachgiebigkeitsreflex können Energieverbrauch und auf den Körper wirkende Scherkräfte minimiert werden. Allerdings stellt sich die Frage, ab wann ein Nachgeben auf extern wirkende Kräfte einen negativen Effekt mit sich bringt. Nach dem hier beschriebenen Konzept kann ein Gelenk nachgeben, solange es sich in einem vordefinierten Arbeitsbereich beziehungsweise Winkelbereich bewegt. Die Grenzen des Winkelbereichs stellen für ein Gelenk Extrembereiche dar, an denen der Nachgiebigkeitsreflex nicht mehr aktiv ist und dem Gelenk keine weiteren Reaktionsmöglichkeiten bleiben. Für eine erneute Aktivierung des Gelenkreflexes kann entweder der Winkelbereich erweitert oder das Gelenk zurück in den erlaubten Winkelbereich bewegt werden, um agieren zu können.

Im folgenden Abschnitt wird eine Erweiterung des Nachgiebigkeitsreflexes vorgestellt, die bei dem Erreichen der definierten Winkelbereichsgrenzen einen Schrittreflex auslöst.

5.3.3 Schrittreflex

Jedes Gelenk hat einen optimalen Winkelbereich, in dem es, vor allem unter Belastung während der Stemmphase, besonders effektiv zum Tragen des Robotergewichts beiträgt. Mit

dem Verlassen seines optimalen Winkelbereichs reduziert ein Gelenk seine Belastbarkeit und trägt zu einem Stabilitätsrisiko für die Laufmaschine bei. Aus diesem Grund ist für jedes Gelenk ein maximaler und ein minimaler Winkelwert definiert, der den Arbeitsbereich des Gelenks einschränkt. Sobald ein Gelenk die definierten Winkelbereichsgrenzen über- oder unterschreitet, muss es zurück in seinen optimalen Arbeitsbereich bewegt werden. Diese Bewegung ist für jedes Gelenk als eigener Schrittreflex implementiert. Der Schrittreflex bewegt das gesamte betroffene Bein und somit auch das entsprechende Gelenk in Form eines Schritts zurück in seinen optimalen Arbeitsbereich. Wird der Nachgiebigkeitsre-

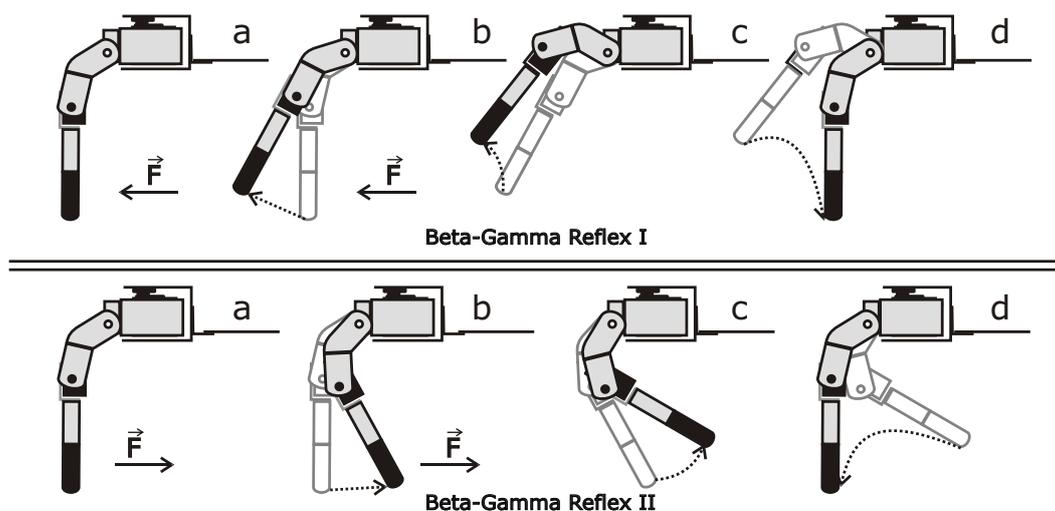


Abbildung 5.12: Schematische Darstellung eines β - γ -Reflexes. I) Schrittreflex nach innen, zum Körper hin und II) Schrittreflex nach außen, vom Körper weg: a) externe Kraft \vec{F} wirkt auf das β - und γ -Gelenk; b) β - und γ -Gelenke geben nach; c) Schrittreflex wird ausgelöst; d) das Bein wird zurück in den optimalen Winkelbereich von β und γ gesetzt.

flex ausgeführt und das entsprechende Gelenk verlässt seinen vordefinierten Winkelbereich, soll sich das Gelenk durch das Ausführen des Schrittreflexes von der wirkenden Kraft lösen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die externen Kräfte in der Regel sehr nah am Fußpunkt eines Beins ansetzen. Diese Kräfte treten während der Stemmphase eines Beins auf und sind abhängig von Gelände und Beinstellung. Wird das Bein durch einen Schrittreflex angehoben, löst sich das Bein von der externen Kraft und kann die betroffenen Gelenke zurück in den optimalen Winkelbereich bewegen.

5.3.3.1 Implementierung

Der Schrittreflex ist als Erweiterung des Nachgiebigkeitsreflexes in der entsprechenden BCU implementiert. Die Umsetzung basiert auf einer einfachen Fallunterscheidung, welche, abhängig von einem binären Stimulus, die Nachgiebigkeit oder einen stereotypen

Schritt als Reaktion auslöst. Die Funktion $U(A_{g,t})$ mit $A_{g,t}$ als normalisierter Messung für den Arbeitsbereich des Gelenks entscheidet, ob ein Schrittreflex ausgeführt wird oder nicht. Abhängig davon, ob sich das Gelenk innerhalb seines Arbeitsbereichs befindet ($A_{g,t} \leq 1$) oder außerhalb ($A_{g,t} > 1$), fällt die Entscheidung für eine von zwei Reaktionen: Ausführung des Schrittreflexes definiert als $R(\alpha, \beta, \gamma)$ oder Ausführung des Nachgiebigkeitsreflexes. Die Funktion U entspricht einer Abbildung von einem eindimensionalen auf einen dreidimensionalen Winkelraum, $U : [0, 2\pi] \rightarrow [0, 2\pi]^3$. Daher wird die Ausführung des Nachgiebigkeitsreflexes über die Funktion E' ausgeführt. E' vergleicht das auslösende Gelenk mit den drei Gelenken α , β und γ und entscheidet, welches Gelenk nachgeben soll:

$$E'(g', g) = \begin{cases} E(S_{g,t}) & : g' = g \\ g' & : g' \neq g \end{cases} \quad (5.7)$$

In der Funktion U wird die Funktion E' für jedes Gelenk berechnet:

$$U(A_{g,t}) = \begin{cases} R(\alpha, \beta, \gamma) & : A_{g,t} > 1 \\ E'(\alpha, g), E'(\beta, g), E'(\gamma, g) & : A_{g,t} \leq 1 \end{cases} \quad (5.8)$$

Der dreidimensionale Winkelraum, in den die Funktion U abbildet, repräsentiert die drei Gelenke eines Beins. Das Erreichen der vordefinierten Winkelbereichsgrenzen kann als Dehnungsstimulus interpretiert werden. Der schnell ausgeführte, vordefinierte, gleichförmige, kurze Schritt entspricht der Reflexreaktion auf den Dehnungsstimulus. Abhängig von dem jeweiligen Gelenk werden unterschiedliche Schritte ausgeführt. Während ein Stimulus im α -Gelenk einen Schrittreflex auslöst, der alle drei Gelenke des entsprechenden Beins mit einbezieht, löst ein Stimulus im β - oder γ -Gelenk einen Schrittreflex aus, der nur zwei Gelenke, das β - und das γ -Gelenk, mit einbezieht.

Abbildung 5.12 zeigt zwei mögliche Versionen für den β - γ -Reflex: I) ein Schrittreflex von außen nach innen und II) ein Schrittreflex von innen nach außen. In Abbildung 5.12 I) wirkt eine externe Kraft \vec{F} von der Innenseite des Beins und drückt das Bein nach außen (a). Nach Erreichen der äußeren Winkelgrenze des β - oder des γ -Gelenks (b) wird der Schrittreflex ausgelöst (c) und das Bein bewegt sich zurück in den optimalen Bereich für das β - und das γ -Gelenk. In Abbildung 5.12 II) ist die gleiche Sequenz für eine nach innen wirkende Kraft \vec{F} und den analogen Schrittreflex illustriert.

5.3.3.2 Experimentelle Ergebnisse und Auswertungen

Die Nachgiebigkeitsreaktion in Kombination mit einem Schrittreflex wurde für jedes Gelenk einzeln getestet. Der experimentelle Ablauf der Nachgiebigkeitsreaktion wurde um die Gelenkwinkelgrenzen ergänzt und um die Schrittreflexreaktion erweitert. In diesem Abschnitt werden exemplarisch zwei experimentelle Ergebnisse betrachtet und ausgewertet. Das erste Experiment beschreibt einen Schrittreflex, ausgelöst durch das α -Gelenk. Im zweiten Experiment wird ein Schrittreflex für die Gelenke β und γ vorgestellt. Die Reaktion entspricht der in Abbildung 5.12 II beschriebenen Reaktion eines Schrittreflexes von

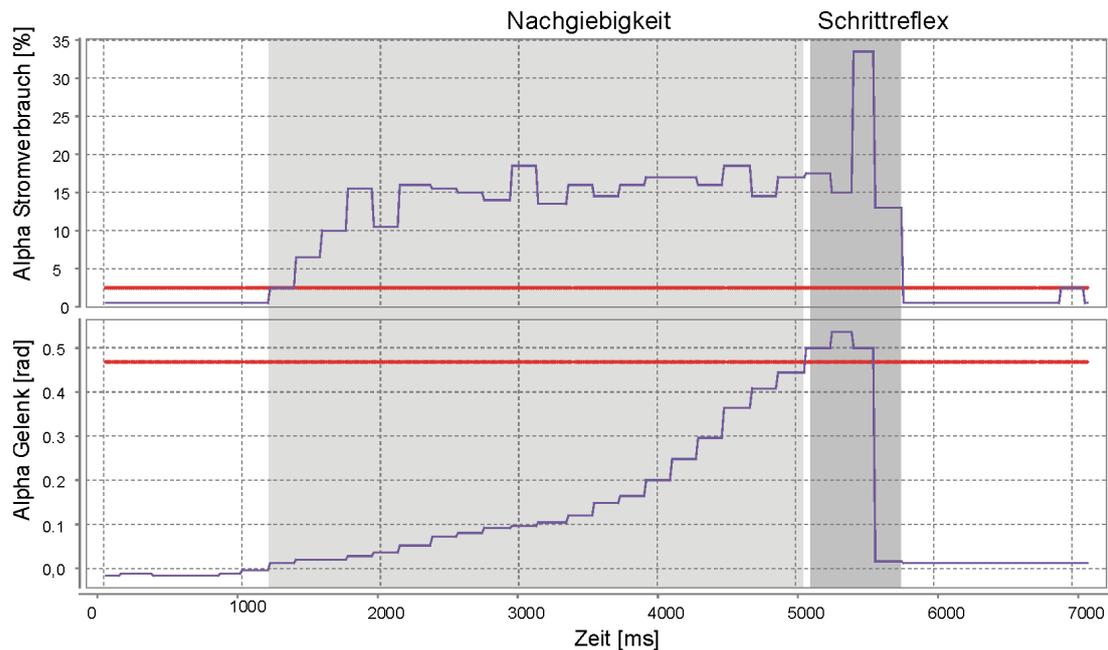


Abbildung 5.13: Nachgiebigkeit im α -Gelenk mit anschließendem Schrittreflex. Stromverbrauch des α -Gelenks in % und Winkelwerte über die Zeit. Der Schwellwert für den Stromverbrauch ist bei 2,5 % und die Grenze des Arbeitsbereichs bei 0,46 rot eingezeichnet.

innen nach außen. Die Messergebnisse für einen β - γ -Schrittreflex von außen nach innen sind im Anhang im Abschnitt A.1 vollständig wiedergegeben.

In dem ersten Experiment ist die obere Winkelgrenze bei 0,46 definiert. Abbildung 5.13 zeigt genau wie Abbildung 5.11 zwei Kurven: den Stromverbrauch eines α -Gelenks in % über die Zeit und den Gelenkwinkel über die Zeit. Der Schwellwert für den Stromverbrauch von 2,5 % und die obere Gelenkwinkelgrenze bei 0,46 ist jeweils als rote Gerade in den entsprechenden Graphen eingezeichnet. Bei 1375 ms überschreitet der Stromverbrauch den vordefinierten Schwellwert von 2,5 % in der oberen Grafik. Gleichzeitig wird der Wert des α -Gelenks in Richtung der vordefinierten Grenze erhöht. Der Stromverbrauch bleibt über dem entsprechenden Schwellwert und der α -Winkel wird kontinuierlich in Richtung der definierten Grenze korrigiert. Bei 5125 ms überschreitet der Winkelwert den Winkelschwellwert.

Bei etwa 5400 ms wird der Schrittreflex ausgelöst und das α -Gelenk wird zurück in eine Ausgangsposition bewegt. Durch das Auslösen des Schrittreflexes löst sich das Bein von der wirkenden Kraft. Während der Bewegung steigt der Stromverbrauch wieder über den entsprechenden Schwellwert. Mit Erreichen der Ausgangsposition sinkt der Stromverbrauch wieder unter den Schwellwert.

Die hier beschriebenen Messungen zeigen, dass die aktive Nachgiebigkeit im α -Gelenk solange ausgeführt wird, bis die definierte Winkelgrenze überschritten und ein Schrittreflex ausgelöst wird. Das α -Gelenk wird von einer externen Kraft in Richtung der Gelenkwinkel-

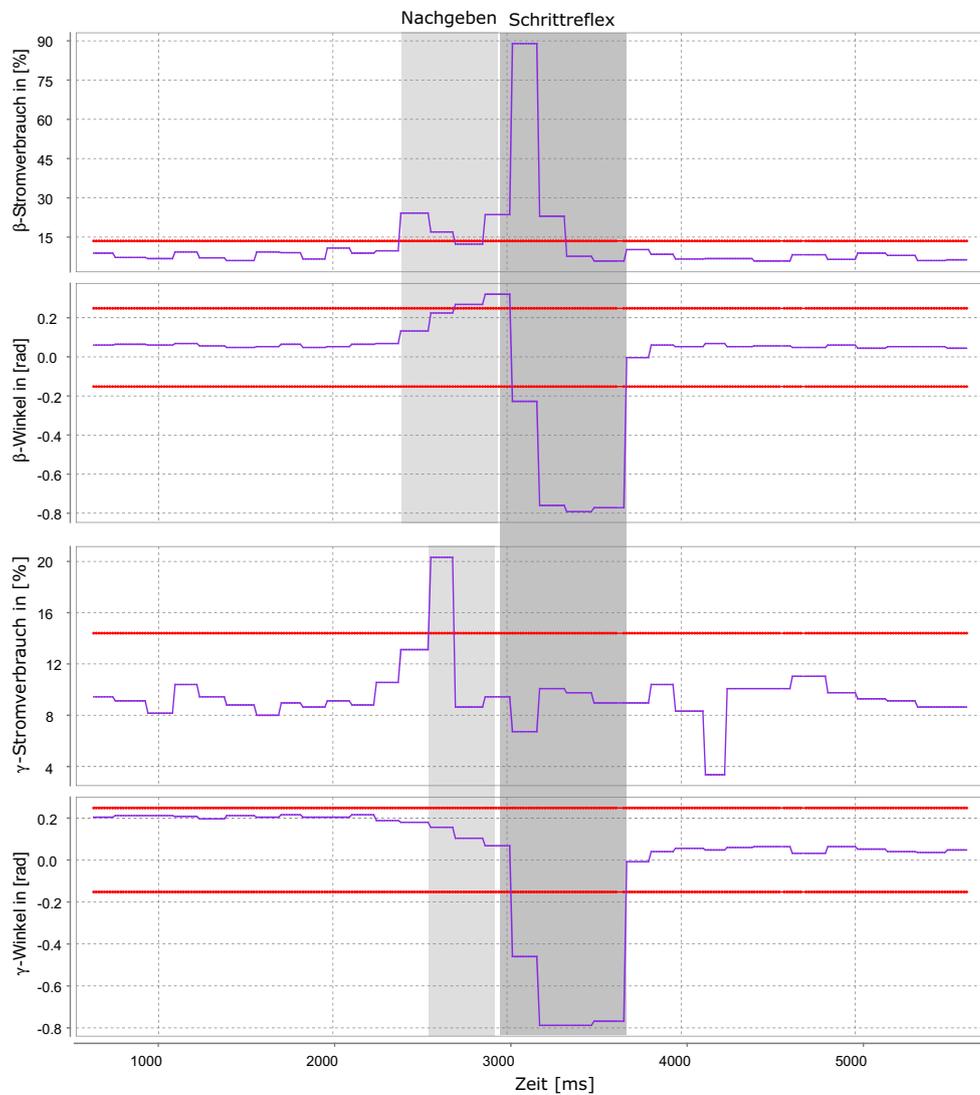


Abbildung 5.14: Nachgiebigkeit im β - und γ -Gelenk mit anschließendem Schrittreflex. Der Stromverbrauch der Gelenke in % und Winkelwerte über die Zeit. Der Schwellwert für den Stromverbrauch ist bei 14% für das β - und das γ -Gelenk angegeben. Die Intervallgrenzen $[-0,19;0,21]$ des optimalen Arbeitsbereichs beider Gelenke sind rot eingezeichnet.

grenze bewegt. Dadurch steigt der Stromverbrauch und das α -Gelenk gibt aktiv nach. Die externe Kraft wirkt weiterhin auf das α -Gelenk und zwingt das Gelenk, seine Winkelgrenze zu überschreiten. Nach der Überschreitung der Winkelgrenze stoppt die Nachgiebigkeitsreaktion und der Schrittreflex wird ausgelöst.

Das Ergebnis für die Untersuchung des β - γ -Reflexes ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Die oberen zwei Grafiken zeigen den Stromverbrauch und die Winkelwerte für das γ -Gelenk und die unteren Grafiken zeigen den Stromverbrauch und die Winkelwerte für das β -Gelenk. Die Grenzen des Arbeitsbereichs sind für beide Gelenke bei $-1,9$ und $2,1$ definiert. Der Schwellwert für den Stromverbrauch ist für beide Gelenke auf 14% gesetzt.

Zwischen 2500 ms und 2600 ms überschreitet erst der Stromverbrauch im β -Gelenk bei 2500 ms und kurz darauf der des γ -Gelenks bei 2600 ms den entsprechenden Schwellwert von 14% . Von den beiden Zeitpunkten an wird im β - und im γ -Gelenk der Winkelwert aktualisiert. Der Winkelwert im β -Gelenk überschreitet bei 2900 ms die im Winkelbereich definierte Grenze von $0,21$. Im Anschluss bewegen sich beide Gelenke zurück in ihren optimalen Arbeitsbereich.

Bei etwa 2900 ms wird der Schrittreflex ausgelöst und die Gelenke β und γ werden zurück in ihre Ausgangspositionen bewegt. Während der Bewegung steigt der Stromverbrauch über den entsprechenden Schwellwert. Mit Erreichen der Ausgangsposition sinkt der Stromverbrauch wieder unter den Schwellwert.

Das Ergebnis zeigt die Funktion der Nachgiebigkeitsreflexe für das β - und für das γ -Gelenk. Die Nachgiebigkeitsphase ist für jedes Gelenk mit einem hellgrauen Hintergrund markiert. Sobald eines der beiden Gelenke seinen vordefinierten Arbeitsbereich verlässt, wird der Schrittreflex ausgelöst und beide Gelenke werden zurück in den Arbeitsbereich bewegt. In diesen Ergebnissen überschreitet das β -Gelenk zuerst eine Winkelbereichsgrenze bei Millisekunde 2900 . Der ausgelöste Schrittreflex für beide Gelenke ist hier mit einem dunkelgrauen Hintergrund markiert.

In diesem Abschnitt wurde der Effekt einer aktiven Nachgiebigkeit auf Gelenkebene vorgestellt und untersucht. Die Auswirkungen der in den einzelnen Gelenken lokal arbeitenden Reflexe auf das sechsbeinige Gesamtsystem werden im folgenden Abschnitt betrachtet.

5.3.4 Reflexbasiertes Laufen

Laufen entspricht der Koordination aller beteiligten Beine sowie der Steuerung der beiden Bewegungsphasen, der Stemmphase und der Schwingphase. Während das Bein sich in seiner Schwingphase vom Boden löst und sich in Bezug zu dem Roboterkörper nach vorne bewegt, um an seiner AEP wieder auf dem Untergrund aufzusetzen, steht das Bein während der Stemmphase mit dem Untergrund in Kontakt und übt auf den Roboterkörper eine Kraft aus, die ihn in Laufrichtung bewegt.

Im Abschnitt 5.1 wurde für die OSCAR-Plattform, basierend auf lokaler Kommunikation, ein dezentrales Konzept zur Koordination vordefinierter Schwing- und Stemmphasen vorgestellt. In diesem Abschnitt wird ein Ansatz beschrieben, der durch die Kombination der beiden beschriebenen Reaktionen, der aktiven Nachgiebigkeit und des Schrittreflexes, Laufen als emergente Reaktion auf eine extern wirkende Kraft auslöst [34].

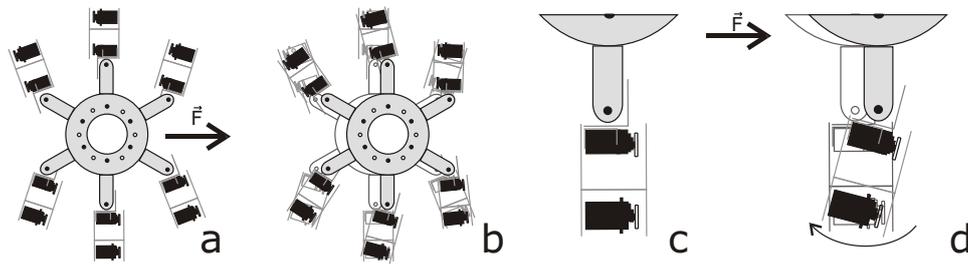


Abbildung 5.15: Schematische Darstellung der Auswirkung einer externen, horizontal wirkenden Kraft auf den Roboter: a) Kraft \vec{F} wirkt auf Roboter; b) Reaktion des Gesamtsystems; c) und d) vergrößerte Ansicht für a) und b) für ein α -Gelenk.

5.3.4.1 Passive Stemmphase und aktive Schwingphase

Ein den Roboter stützendes Bein, das entweder steht oder den Nachgiebigkeitsreflex ausführt, ist mit einem Bein in der Stemmphase vergleichbar. Ein wesentlicher Unterschied zwischen einem Bein in der Nachgiebigkeitsbewegung und einem Bein in der Stembewegung sind Ursache und Wirkung von Bewegung. Ein Bein in der Stemmphase bewegt sich aktiv entgegen der Laufrichtung und übt auf den Roboterkörper eine Kraft aus, die ihn in Laufrichtung drückt. Die Nachgiebigkeit ist eine Reaktion auf eine extern wirkende Kraft. Sie übt keine Kraft auf den Roboterkörper aus, sondern gibt einer wirkenden Kraft nach. Somit kann die Bewegung der aktiven Nachgiebigkeit als passive Stemmphase, die das Resultat einer extern wirkenden Kraft ist, interpretiert werden. Abbildung 5.15 zeigt eine schematische Darstellung von oben auf die Laufmaschine. In a) ist eine externe Kraft \vec{F} illustriert, die auf den Roboterkorpus wirkt. Unter b) ist die Reaktion als Resultat der aktiven Nachgiebigkeitsreaktion in jedem α -Gelenk skizziert. In c) und d) wird die Reaktion auf die externe Kraft im α -Gelenk vergrößert dargestellt.

Der beschriebene Schrittreflex ist sehr ähnlich zu einer vordefinierten Schwingphase. Ein wichtiger Unterschied zwischen dem Schrittreflex und der regulären Schwingphase liegt in der Ausführungsdauer. Begründet durch die schnelle Reflexreaktion, ist der Schrittreflex sehr viel kürzer als die Schwingphase. Die Arbeitsbereichsgrenzen bei den Reflexen sind vergleichbar mit der PEP, bei der die Schwingphase startet. Dieser Koordinationseinfluss bei der regulären Schwingphase ist neben anderen Einflüssen in 5.1.2 genauer beschrieben. Ein weiterer Unterschied zwischen dem Schrittreflex und der regulären Schwingphase besteht in der Möglichkeit, dass der Schrittreflex an einer der beiden Arbeitsbereichsgrenzen ausgelöst werden kann. Der Schrittreflex reagiert in zwei Richtungen, während in dem unter 5.1 beschriebenen Laufen eine Laufrichtung gegeben ist und die Schwingphase nur in Laufrichtung ausgeführt wird.

Der Schrittreflex stellt in Bezug auf die Stabilität des Roboters eine kritische Reaktion dar. Durch das Anheben des Beins beendet der Reflex die unterstützende Funktion des ent-

sprechenden Beins bei dem Tragen des Roboterkörpergewichts. Aus diesem Grund muss zur Stabilitätssicherung das gleichzeitige Auslösen des Schrittreflexes in benachbarten Beinen vermieden werden. Mit der Interpretation des Nachgiebigkeitsreflexes als Stemmphase und des Schrittreflexes als Schwingphase kann die Koordination der Beine durch denselben Algorithmus zur Beincoordination aus Abschnitt 5.1.2 implementiert werden.

Jedes Bein entscheidet abhängig von den Informationen über seine Nachbarbeine lokal, ob bei dem auftretenden Reiz der Schrittreflex ausgelöst oder der Nachgiebigkeitsreflex weiter ausgeführt wird. Für den Fall, dass mindestens ein Nachbarbein bereits einen Schrittreflex ausführt, unterdrückt die verantwortliche BCU den Schrittreflex und erweitert temporär den vordefinierten Arbeitsbereich, um die weitere Ausführung der Nachgiebigkeitsreaktion auszuführen. In dem Fall, dass kein Nachbarbein einen Schrittreflex auslöst, wird der Schrittreflex im eigenen Bein ausgelöst. Nach Abschluss des Schrittreflexes wird erneut der Stromverbrauch gemessen und gegebenenfalls der Nachgiebigkeitsreflex ausgelöst.

Die Kombination der beiden Reflexe und der lokalen Beincoordination kann zu einem Laufverhalten als Reaktion auf eine extern auf den Roboter wirkende Kraft führen. Wirkt kontinuierlich eine horizontale, externe Kraft auf die Maschine, führt dies zu einem zyklischen Auslösen der Reize für den Nachgiebigkeitsreflex und den Schrittreflex, die einer Stemm- und einer Schwingphase entsprechen.

5.3.4.2 Experimentelle Ergebnisse

Zur Untersuchung des Laufens als emergente Reaktion wird der Roboter auf einen ebenen Untergrund gestellt. Die Gelenke der Maschine befinden sich in der Mitte des vordefinierten Arbeitsbereichs. Für das Laufverhalten und eine bessere Kraftverteilung sind die Winkelbereiche wie in Abbildung 5.15 gezeigt definiert. So wird eine externe Kraft, die auf die Front beziehungsweise auf die Rückseite der Maschine wirkt, optimal auf die α -Gelenke verteilt.

Die externe Kraft wird über ein Seil, das an der Roboterfront befestigt ist, auf die Maschine ausgeübt. Die wirkende Kraft verteilt sich auf die sechs α -Gelenke und löst in jedem Bein den Nachgiebigkeitsreflex aus. Die Laufmaschine bewegt sich in Richtung der wirkenden Kraft. Lässt die Kraft wieder nach, bewegt sich der Körper zurück in seine Ausgangsposition.

Eine kontinuierlich über das Seil wirkende, externe Kraft führt zu dem Auslösen der Schrittreflexe in den α -Gelenken. Die hier beschriebene lokale Koordination der Beine verhindert durch die Unterdrückung des gleichzeitigen Ausführens der Schrittreflexe in benachbarten Beinen einen instabilen Zustand der Roboterplattform.

In diesem Experiment wird die Roboterplattform auf ebenen Untergrund gestellt. Auf ein an der Vorderseite der Maschine befestigtes Seil wird manuell eine horizontale Zugkraft ausgeübt, welche die Maschine nach vorne zieht. Durch die Zugkraft wird die Maschine in Bewegung versetzt. Bei der Bewegung der Maschine kann beobachtet werden, dass die externe Kraft auch eine Neigung der Maschine um die Querachse auslöst. Während des Experiments werden in allen Gelenken Stromverbrauch und Position abgefragt und

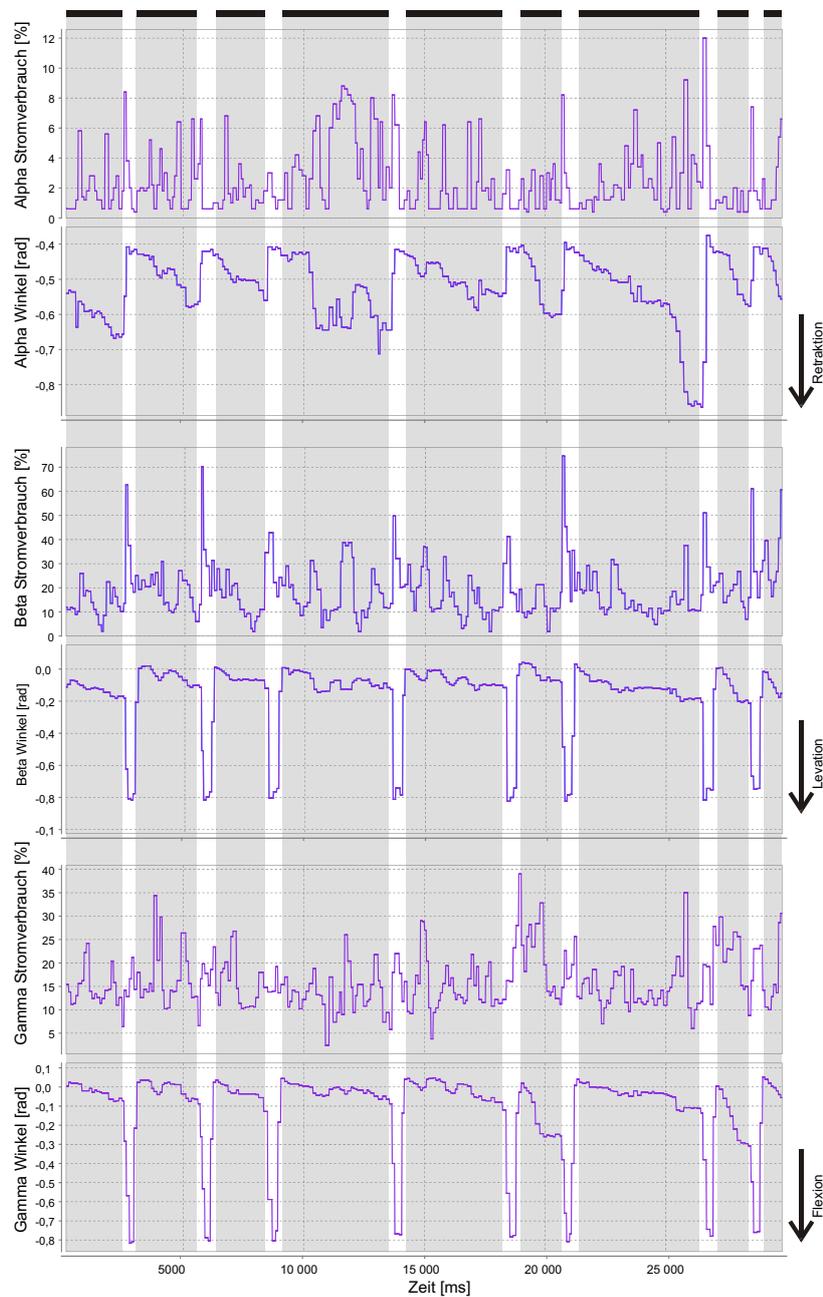


Abbildung 5.16: Ausschnitt aus einer Laufreaktion auf eine externe Kraft: Stromverbrauch und Gelenkwinkel über die Zeit für das α -, β - und γ -Gelenk des linken Vorderbeins. Grauer Hintergrund markiert die Nachgiebigkeit, weißer Hintergrund den Schrittreflex. Bodenkontakte des Beins sind durch schwarze Balken am oberen Rand gekennzeichnet.

zur anschließenden Analyse gespeichert. In den folgenden Absätzen wird ein 30sekündiger Ausschnitt aus den aufgenommenen Daten ausgewertet.

In Abbildung 5.16 sind der Stromverbrauch und die Winkelwerte über die Zeit für die drei Gelenke α , β und γ des linken Vorderbeins aufgetragen. Das Diagramm zeigt einen Ausschnitt von 30 Sekunden. Die Winkelwerte sind für jedes Gelenk in Radiant und der Stromverbrauch in Prozent über die Zeit in Millisekunden eingezeichnet. Die der Stemmphase entsprechende aktive Nachgiebigkeit des Beins ist grau hinterlegt. Schwarze Balken am oberen Rand der Grafik markieren den Bodenkontakt des Beins. Der Schrittreflex, der einer Schwingphase entspricht, ist durch einen weißen Hintergrund gekennzeichnet.

Wie in Abbildung 5.15 zu erkennen, ist der Arbeitsbereich des linken Vorderbeins verschoben. Die Mittelposition des α -Gelenks liegt nach der Verschiebung bei $-0,4$. Die für die Laufrichtung entscheidende Winkelgrenze ist bei $-0,58$ definiert.

Bei Sekunde 0 des in Abbildung 5.16 gezeigten Ausschnitts steht das Bein und geht in die Stemmphase, repräsentiert durch den Nachgiebigkeitsreflex, über. Nach ungefähr zwei Sekunden wird das α -Gelenk durch den Schrittreflex wieder zurück zu seinem Ausgangswinkel bewegt. Der Schrittreflex wird von allen drei Beingelenken ausgeführt. Das α -Gelenk führt während des Schrittreflexes eine Protraktion aus. Das β - und das γ -Gelenk führen zum Anheben des Beins eine Levation und eine Flexion und zum Absenken eine Depression und eine Extension aus und setzen den Fuß nach etwa drei Sekunden wieder auf dem Boden ab. Während des 30sekündigen Ausschnitts werden acht Schrittreflexe ausgeführt. Es ist zu erkennen, dass sich die Stemmphasen in ihren Längen unterscheiden.

In der Stemmphase von 21500 ms bis 26500 ms wird der Effekt der lokalen Koordination deutlich. Das Auslösen des Schrittreflexes wird hier unterdrückt und die untere Winkelgrenze wird verschoben.

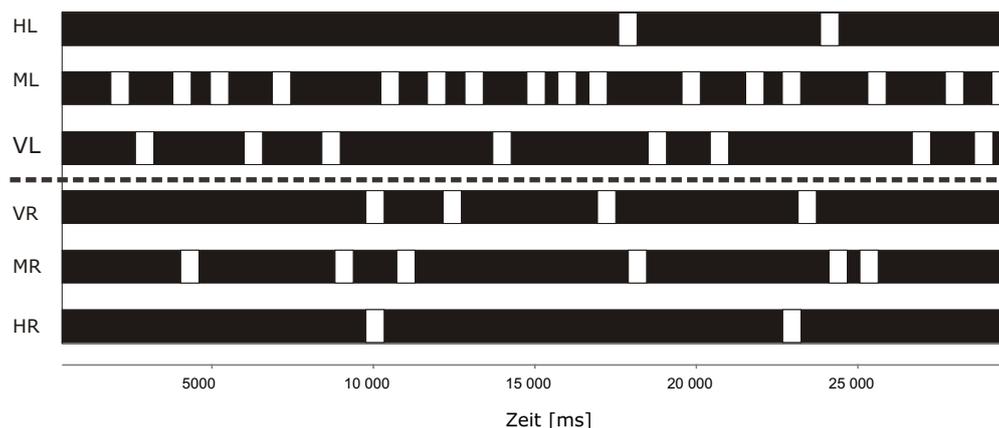


Abbildung 5.17: Schrittmuster für das linke Hinter- (HL), Mittel- (ML), Vorder- (VL) und das rechte Vorder- (VR), Mittel- (MR) und Hinterbein (HR) über die Zeit. Schwarze Balken repräsentieren die Stemm- und weiße Balken die Schwingphasen beziehungsweise die Schrittreflexe.

Durch zu wenig Reibung und dem Wegrutschen der Füße unterscheiden sich die Stemmphasen der verschiedenen Beine stark. Vor allem die Hinterbeine führen seltener Schrittreflexe aus. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Roboterplattform sich während des Experiments unter der wirkenden Zugkraft vorne leicht nach unten neigt. Dadurch reduziert sich der Druck auf die Hinterbeine und deren Fußaufsatzpunkte. Als Folge rutschen die Hinterfüße häufiger über den Untergrund. Auch das Neigen der Front nach oben kann beobachtet werden und führt zu der entgegengesetzten Stemm-Schwing-Verteilung von Vorder- und Hinterbeinen.

Eine Übersicht über die Stemm- und Schwingphasen aller sechs Beine zeigt das Schrittmusterdiagramm in Abbildung 5.17. Das Diagramm zeigt von oben nach unten das linke Hinter-, Mittel- und Vorderbein und das rechte Vorder-, Mittel- und Hinterbein. Die schwarzen Balken repräsentieren Bodenkontakt, die weißen Lücken entsprechen den Schrittreflexen. Während die externe Kraft kontinuierlich auf beide Vorder- und Mittelbeine zu wirken scheint, führen die beiden Hinterbeine während der 30 Sekunden nur zwei Schrittreflexe aus.

5.3.4.3 Auswertung

Die Untersuchung der Reflexe auf Gelenkebene und die Einführung des Schrittreflexes sowie die experimentelle Untersuchung der Gesamtreaktion haben gezeigt, dass eine aktive Nachgiebigkeit mit Standard-Servomotoren mittels der Messung des Stromverbrauchs möglich ist. Die damit erreichte Nachgiebigkeit beziehungsweise Elastizität in den einzelnen Gelenken kann zum einen den Energieverbrauch der Laufmaschine senken und zum anderen die explizite Berechnung von Gelenkwinkeln ersparen.

Das Ersetzen einer expliziten Berechnung der Winkelwerte durch den Einsatz adaptiver Nachgiebigkeit könnte in der Stemmphase der Beine und während des Kurvenlaufens ausgenutzt werden.

In der Stemmphase bilden die Stützbeine des Roboters, die mit dem Untergrund in festem Kontakt stehen, eine geschlossene kinematische Kette. Steht die Maschine mit allen sechs Beinen auf dem Untergrund, mit dem Ziel, ihren Körper in eine definierte Neigung zu bewegen, ohne eines der Beine vom Untergrund zu lösen, müssen die 18 Gelenkwinkel in den sechs Beinen für die Bewegung berechnet werden. Die Ergebnisse in diesem Abschnitt haben gezeigt, dass diese Berechnung nicht notwendig ist, wenn jedes Gelenk die lokal detektierte Kraft durch Nachgeben kompensiert. Es kann davon ausgegangen werden, dass es ausreicht, eine Auswahl von Gelenkwinkeln zu berechnen und nur diese Gelenke aktiv in die gewünschte Position zu bewegen, während die übrigen Gelenke der lokal detektierten Kraft nachgeben und ohne explizite Berechnung der gewünschten Gesamtbewegung folgen.

Biologische Experimente mit Stabheuschrecken haben gezeigt, dass während des Kurvenlaufens die einzelnen Beine abhängig von der gelaufenen Kurve individuellen Trajektorien folgen [28, 33]. Eine Symmetrie zwischen zwei Beinen, wie sie während des Geradeauslaufens beobachtet werden kann, scheint es nicht zu geben. Die biologischen Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Bewegungsrichtung von den Vorderbeinen des Insekts

ausgeht und die Mittel- und Hinterbeine folgen. Dabei scheinen die Vorderbeine den Körper aktiv in eine Richtung zu bewegen, während die Gelenke der Mittel- und Hinterbeine der Bewegung durch eine positive Verstärkung der detektierten Kraft folgen.

Diese Beobachtung hat große Ähnlichkeit mit der hier untersuchten Gesamtreaktion der Maschine auf eine extern wirkende Kraft. Wenn statt der extern wirkenden Kraft die Kraft von den eigenen Vorderbeinen der Laufmaschine ausgeht, diese also aktiv bewegt werden und die Richtung vorgeben, während die Mittel- und Hinterbeine der Bewegung folgen, entspräche dies dem biologischen Vorbild der Stabheuschrecke. Dazu bedarf es allerdings Servomotoren mit einem höheren Stellwert in den Vorderbeinen, um eine ausreichend große Kraft zu erzeugen.

5.3.5 Reflexe auf Beinebene

Sechsbeiniges Laufen kann durchgehend in einem statisch stabilen Stadium durchgeführt werden. Auf ebenem Untergrund kann sechsbeiniges Laufen nach einem festen, vorgegebenen Muster ohne Sensor umgesetzt werden. Eine Maschine kann so „blind“ ohne Interaktion mit ihrer Umwelt auf sechs Beinen laufen. Solche fest einprogrammierten Bewegungsmuster steuern heutzutage kommerziell erwerbbarer Spielzeug- und Hobbyroboter. Diese reichen von sechs- über vier- bis hin zu zweibeinigen Robotern. Solange die statische Stabilität gesichert ist, reicht eine sehr einfache stereotype Abfolge von Bewegungen aus. Auf unebenem Gelände stößt solch eine Steuerung allerdings schnell an ihre Grenzen. Die häufigsten Schwierigkeiten auf unebenem Gelände sind unterschiedlich hohe Auftrittspunkte der Füße, fehlender Untergrund und Hindernisse, die das Bein an einer Vorwärtsbewegung in seiner Schwingphase hindern. Mit einem festen Bewegungsmuster ohne sensorische Eingaben beendet jedes Bein seine Schwingphase an einer vorgegebenen Position. Diese Position entspricht auf flachem Untergrund dem Bodenlevel.

Trifft ein Bein vor Erreichen seiner Zielposition auf den Untergrund, wird es sich ohne Bodendetektion weiter strecken und im ungünstigsten Fall den Roboterkörper anheben. Beine, die sich in der Stemmphase befinden, können dann den Bodenkontakt verlieren, und der Läufer kann in eine instabile Position geraten.

Tritt ein Bein in eine Lücke im Boden und beendet seine Schwingphase ohne Bodenkontakt, stützt es die Laufmaschine nicht. Wechseln die Nachbarbeine in dieser Situation in die Stemmphase, verliert der Roboter den Bodenkontakt und somit auch seine Stabilität.

Stößt ein Bein während der Schwingphase an ein Hindernis, ohne dieses zu detektieren, wird es versuchen, seine Zielposition zu erreichen. Dies kann abhängig von der Stärke der Servomotoren und der Bodenhaftung der Füße dazu führen, dass das Bein den Roboter entgegen seiner Laufrichtung zurück schiebt, der Roboter sich nicht mehr von der Stelle bewegt oder der blockierte Servomotor ausfällt. Um auf derartige Situationen reagieren zu können, muss die Laufsteuerung um angepasste Reaktionen erweitert werden [80]. Diese Reaktionen beziehen immer die drei Gelenke eines Beins mit ein und werden hier als Beinreaktionen beziehungsweise als Reflexe auf Beinebene mit folgenden Namen bezeichnet: Bodendetektionsreflex, Suchreflex und Levatorreflex.

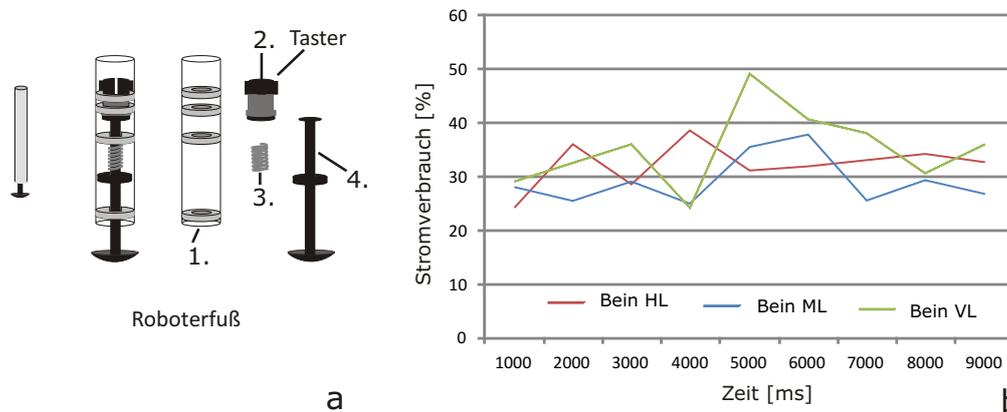


Abbildung 5.18: Bodendetektion: a) Schematischer Aufbau des Tasters zur Bodendetektion mit Halterung (1), Taster (2), Feder (3) und Fuß (4). b) Referenzstromverbrauch der β -Gelenke für das linke Vorder- (VL), Mittel- (ML) und Hinterbein (HL) während der Absenkphase ohne Bodendetektion.

5.3.6 Bodendetektionsreflex

Die Bodendetektion stellt den Reiz und das Stoppen der Schwingphase die Reaktion dar. Für eine Bodendetektion ist eine sensorische Wahrnehmung für jedes Bein nötig. Aufgrund der hohen Bedeutung der Bodendetektion für das Laufen ist für den Fall eines Ausfalls ein redundantes Signal von Vorteil. Eine einfache Umsetzung der Bodendetektion kann mittels eines mechanischen Tasters im Roboterfuß erreicht werden. Tritt der Fuß auf dem Untergrund auf, schließt der Taster. Löst sich der Fuß vom Boden, öffnet der Taster. Eine schematische Darstellung des hier eingesetzten Tasters ist in Abbildung 5.18 zu sehen.

Die Umsetzung der Bodendetektion durch den Einsatz von Tastern kann der Abbildung 5.18 a) entnommen werden. Die Signale werden binär an den I²C zu USB Adapter geleitet und dort umgewandelt. Der steuernde Rechner kann die Signale dann digital über den I2C-USB Adapter abfragen. Damit der Taster optimal funktioniert, muss der Roboterfuß möglichst senkrecht auf dem Untergrund aufgesetzt werden. Andere Beininstellungen während des Bodenkontakts und auch Unebenheiten im Gelände reduzieren die Zuverlässigkeit der Tasterfunktionalität.

Ein redundantes Signal kann, ähnlich wie im Abschnitt 5.3.2, über den Stromverbrauch der Servomotoren abgefragt werden. Der Bodenkontakt wirkt wie ein Widerstand, der zum Ende der Schwingphase den Stromverbrauch des Servomotors erhöht. Das Überschreiten eines vordefinierten Schwellwerts kann als Reiz interpretiert werden, der das Beenden der Schwingphase auslöst. Die Bodendetektion durch Messung des Stromverbrauchs im β -Gelenk ist unabhängig von der Beininstellung und von Unebenheiten im Untergrund.

Im Folgenden wird die Implementierung der Bodendetektion, basierend auf dem gemessenen Stromverbrauch im β -Gelenk, vorgestellt. Die Bodendetektion mittels mechanischen Schalters wird hier nicht weiter erläutert.

5.3.6.1 Implementierung

Die zusätzliche Bodendetektion mittels Auswertung des Stromverbrauchs wurde mit einem einfachen Algorithmus während des Absenkens des Beins in der Schwingphase umgesetzt. Der Unterschied im Stromverbrauch ist, bedingt durch die Anordnung der Gelenke und Segmente, im β -Gelenk am deutlichsten. Der Stromverbrauch des α - und des γ -Gelenks wird für die Bodendetektion nicht ausgewertet.

In der Schwingphase eines Beins können drei Teilphasen unterschieden werden. Die „Anhebephase“, in der das Bein hauptsächlich angehoben wird, die „Protraktionsphase“, in der das Bein hauptsächlich in Laufrichtung bewegt wird und die „Absenkphase“, in der das Bein in Richtung Untergrund bewegt, also abgesenkt wird.

Die vergleichende Untersuchung des Stromverbrauchs in den β -Gelenken der sechs Beine während ihrer Absenkphasen ohne Bodendetektion ergibt signifikant unterschiedliche Verläufe im Stromverbrauch zwischen den einzelnen Beinen. In Abbildung 5.18 b) sind die Unterschiede der Referenzmessung deutlich erkennbar. In der Abbildung werden die Stromverbräuche des linken Vorder-, des linken Mittel- und des linken Hinterbeins während ihrer Absenkphasen ohne Bodendetektion gezeigt. Bis auf das linke Vorderbein, hier mit Bein VL betitelt, liegen die Kurven für den Stromverbrauch aller Beine in einem Wertebereich von 25 % bis 49 %. Durch die signifikanten Unterschiede der verschiedenen Kurven untereinander kann den Beinen kein gemeinsamer Schwellwert für die Bodendetektion zugewiesen werden. Daher wird für die β -Gelenke jedes Beins ein eigener Schwellwert S_β wie folgt errechnet:

$$S_\beta = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x_i(\beta)}{n-1} + \text{offset} \quad (5.9)$$

Die Berechnung des Schwellwertes S_β entspricht dem Mittelwert aller bislang in der aktuellen Absenkphase aufgenommenen Werte, summiert mit einer definierten, tolerierten Abweichung (*offset*). Der vordefinierte Wert für die tolerierte Abweichung ist an die Standardabweichung angelehnt, für die sich in mehreren Messreihen ein konstanter Wert ergab. Für die Berechnung des Mittelwertes wurde nach der Auswertung von Messreihen eine Mindestanzahl von vier Werten vorausgesetzt.

In jedem Berechnungsschritt wird der aktuell gemessene Wert des Stromverbrauchs mit dem aus den bisherigen Werten errechneten Schwellwert verglichen. Eine Überschreitung des berechneten Schwellwertes wird als Bodenkontakt interpretiert und stoppt die aktuelle Absenkphase des Beins.

$$B(\beta_n, S_\beta) = \begin{cases} 1 & : \beta_n > S_\beta \\ 0 & : \beta_n \leq S_\beta \end{cases} \quad (5.10)$$

In Formel 5.10 ist die Funktion $B(\beta_n, S_\beta)$ als Abbildung von dem Stromverbrauch des β -Gelenks zum aktuellen Zeitpunkt n auf eine Bool'sche Menge ($B : [0; 1] \rightarrow \{0, 1\} = \mathbb{B}$) abgebildet. Dabei sind die Elemente der Menge $\{0, 1\}$ mit 0 für keinen Bodenkontakt und

1 für Bodenkontakt kodiert. Die Ausgabe von 0 oder 1 ist abhängig von dem Vergleich des Stromverbrauchs im β -Gelenk mit dem berechneten Schwellwert S_β .



Abbildung 5.19: Testgelände für die Bodendetektion aus 10x10 cm Kanthölzern. Die Kanthölzer sind in Vierergruppen mit verschiedenen Höhen angeordnet.

5.3.6.2 Experimentelle Ergebnisse

Für die Evaluation des hier vorgestellten Ansatzes zur Bodendetektion, basierend auf der Messung des Stromverbrauchs, läuft die Roboterplattform über ein vorbereitetes Testgelände mit definierten Höhenunterschieden im Untergrund.

Ein Modell des Testgeländes mit der Roboterplattform an der entsprechenden Startposition ist in Abbildung 5.19 zu sehen. Das Testgelände besteht aus einer quadratischen Grundplatte mit einer Seitenlänge von 120 cm. Vier Begrenzungshölzer zu je 95 cm Länge und 3,4 cm Höhe rahmen hundert Kanthölzer ein. Die Kanthölzer sind 10 cm breit und 10 cm lang und in Vierergruppen zu je 2,5 cm und 5,0 cm Höhe angeordnet.

Das hier vorgestellte Testgelände bietet den Vorteil, dass der Roboter in regelmäßigen Abständen mit Höhenunterschieden im Untergrund konfrontiert wird. Durch die größeren Flächen und die geringen Höhenunterschiede wird das Risiko verringert, dass ein Bein in seiner Schwingphase gegen eine Stufe stößt.

Während des Experiments werden die Winkelwerte und der Stromverbrauch im β -Gelenk gemessen. Der Roboter wird auf ebenem Untergrund am Rand des Testgeländes platziert und beginnt auf das Testgelände zu steigen. Der erste zu überwindende Höhenunterschied beträgt etwa 35 mm. Abbildung 5.20 zeigt den Verlauf der Winkelwerte in Radiant und den gemessenen Stromverbrauch in Prozent des β -Gelenks über die Zeit in Sekunden. Zur Verdeutlichung sind die aufgetragenen Werte während der Stemmphasen grau hinterlegt. Zusätzlich zu dem Stromverbrauch sind in der unteren Grafik die berechneten Schwellwerte in der Absenkphase des Beins in Rot ergänzt. Für die weitere Analyse sind die fünf relevanten Phasen mit I) bis V) durchnummeriert.

I) Schwingphase von 0,75 s bis 5 s: Während der ersten Schwingphase von Sekunde 0,75

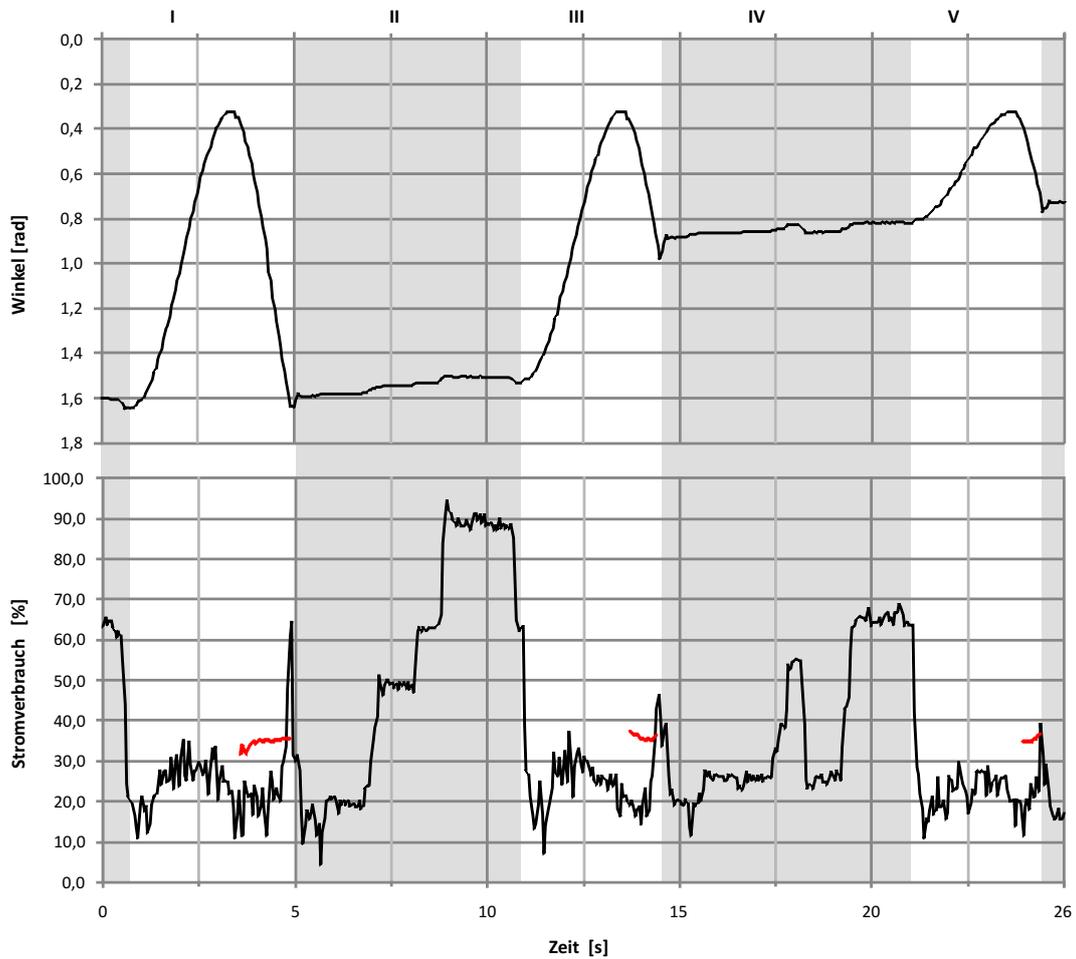


Abbildung 5.20: Bodendetektion des rechten Vorderbeins mittels Stromverbrauch im β -Gelenk: Winkelwerte in Radiant und Stromverbrauch in % über die Zeit in [ms]. Aus der aktuellen Schwingphase berechneter Schwellwert für die Bodendetektion in Rot. Schwingphasen sind weiß und Stemmphasen hellgrau hinterlegt.

bis Sekunde 5 variieren die Werte im Stromverbrauch in den ersten 3,5 Sekunden zwischen 10 % und 35 %. Ab Sekunde 3 in der Absenkbewegung wird der hier in Rot eingezeichnete Schwellwert für die Bodendetektion berechnet und kontinuierlich aktualisiert. Der Schwellwert steigt von etwa 32 % auf etwa 35 % an. Bei Sekunde 4,9 überschreitet der Stromverbrauch deutlich den bis dahin berechneten Schwellwert. Die Schwingphase endet und das Bein wechselt in die Stemmphase. Die Winkelwerte des β -Gelenks zeigen den charakteristischen, parabelähnlichen Verlauf. Die Parabelform beginnt und endet bei einem Winkelwert von 1,6 und erreicht ihren Scheitelpunkt bei 0,3. **II)** Stemmphase von 5 s bis 11 s: Über den gesamten Zeitraum der Stemmphase ist in der Gelenkwinkelkurve ein leichter Abfall von 1,6 auf 1,5 in den Winkelwerten erkennbar. Im Stromverbrauch ist nach einem kurzen Abfall auf unter 10 % bei Sekunde 5,5 ein starker Anstieg auf maximal 92 % während der Stemmphase erkennbar. Der Anstieg im Stromverbrauch ist stufenförmig. Es sind vier Stufen erkennbar, die von unter 10 % auf 20 %, anschließend auf 50 %, dann auf 62 % und abschließend auf 92 % ansteigen. Mit Abschluss der Stemmphase fällt der Stromverbrauch auf unter 20 % stark ab.

III) Schwingphase von 11 s bis 14,8 s: Die Winkelwerte zeigen über die Zeit den charakteristischen, parabelähnlichen Verlauf für eine Schwingphase. Allerdings beginnt die parabelähnliche Kurve bei etwa 1,5 Radiant und endet bei etwa 0,9 Radiant. Mit Absenken des Beins sind die Schwellwerte von Sekunde 14,1 bis Sekunde 14,8 zwischen 35 % und 37 % berechnet. Zum Zeitpunkt 14,8 s überschreitet der gemessene Stromwert den berechneten Schwellwert und das Bein wechselt in die Stemmphase.

IV) Stemmphase von 14,8 s bis 21,5 s: Die Winkelwerte fallen über den Zeitraum der Stemmphase von 0,9 auf 0,8 ab. Der Stromverbrauch liegt, bis auf zwei Ausschläge, zwischen 20 % und 30 %. Der erste Ausschlag findet zum Zeitpunkt 18 s statt und erreicht einen Wert von 55 %. Der zweite Ausschlag beginnt bei Sekunde 19,5 s und hält bis zum Ende der Stemmphase bei 21,5 s an. Dabei hält sich der Stromverbrauch bei etwa 65 %.

V) Schwingphase von 21,5 s bis 25 s: In dieser Schwingphase beginnt die Kurve der Winkelwerte bei etwa 0,8 und beschreibt die charakteristische parabelähnliche Form bis zu einem Wert von etwa 0,7. Die Stromwerte schwanken bis kurz vor dem Ende der Schwingphase bei 25 s zwischen 10 % und 30 %. Der berechnete Schwellwert in der Absenkphase liegt bei 36,5 %. Dieser wird zum Ende der Schwingphase von dem Stromwert überschritten.

5.3.6.3 Auswertung

Die beschriebenen Kurven zeigen, dass der Bodendetektionsreflex, basierend auf der Messung des Stromverbrauchs, zuverlässig funktioniert. Die parabelförmigen Verläufe der Winkelwerte entsprechen den Schwingphasen des Beins und die nahezu konstanten Verläufe repräsentieren die Stemmphasen des Beins. In der Schwingphase wird das Bein durch das β -Gelenk angehoben und wieder abgesenkt. Bis zum Scheitelpunkt der Winkelkurve bei 0,3 in der Schwingphase wird das Bein angehoben und von dort an wieder abgesenkt. Gleichzeitig mit dem Absenken setzt nach den ersten vier gemessenen Stromwerten die Berechnung des Schwellwerts ein.

Mit dem Überschreiten der Schwellwerte in den Schwingphasen enden diese und die Stemmphasen beginnen. Zum Ende der mit III) betitelten Schwingphase ist gut erkennbar, dass der Stromverbrauch den errechneten Schwellwert überschreitet, bevor die Schwingphase ihren Ausgangswinkelwert erreicht hat. Hier wurde erfolgreich Untergrund detektiert. Das Gelenk übergibt seinen aktuellen Winkelwert an die Stemmphase.

Die Differenz zwischen dem Ausgangswinkel und dem Endwinkel der Schwingphase III) beträgt etwa 0,6. Das mediale Segment des Roboterbeins verbindet das β - und das γ -Gelenk miteinander und hat eine Länge von 60 mm. Eine Winkeldifferenz von 0,66 entspricht einem Höhenunterschied von etwa 34 mm. Diese Höhendifferenz stimmt mit der Höhe des Hindernisses in dem beschriebenen Testaufbau überein.

Während der Stemmphasen sind im Stromverbrauch abrupte, starke Anstiege der Werte zu erkennen. Diese lassen auf eine plötzlich auftretende Belastung des Gelenks schließen. Diese Belastung kann dadurch erklärt werden, dass im Laufe der Stemmphase andere Beine von der Stemm- in die Schwingphase wechseln. Das Körpergewicht wird mit diesen Wechseln direkt auf die verbleibenden, stemmenden Beine verteilt. Die steigende Belastung auf dem Gelenk erklärt auch das Nachgeben im Verlauf der Winkelkurve. Dies fällt besonders zum Ende der Stemmphase II) auf. Hier gibt das Gelenk unter einer extremen Belastung nach.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass mittels der Messung des Stromverbrauchs im β -Gelenk der Fußkontakt mit dem Untergrund erkannt werden kann. Die Berechnung des Schwellwerts ist abhängig von den aktuellen Stromverbrauchswerten in der Absenkbewegung der Schwingphase berechnet worden. Die Berechnung ist auf den aktuellen Stromverbrauch abgestimmt und kann zum einen für Servomotoren eingesetzt werden, die Unterschiede im Stromverbrauch aufweisen und zum anderen können langfristige Veränderungen des Stromverbrauchs eines Servomotors kompensiert werden.

Ein weiterer Vorteil der Bodendetektion durch die Messung des Stromverbrauchs ist die Unabhängigkeit von der Beinstellung während des Bodenkontakts. Dies macht diesen Ansatz zuverlässiger als die Bodendetektion durch den hier eingesetzten Taster.

Das hier vorgestellte Konzept stößt in zwei Situationen an seine Grenzen. Tritt der Fuß unmittelbar mit dem Beginn der Absenkphase auf festen Untergrund, können keine Referenzwerte für die Bodendetektion mittels Stromverbrauch aufgezeichnet werden. Auch wenn das Bein während der Absenkphase mit einem zusätzlichen Gewicht belastet ist, können sich je nach Gewicht unbrauchbare Referenzwerte ergeben. In beiden Fällen muss sich der Roboter auf den mechanischen Taster verlassen.

5.3.7 Suchreflex

Das Gegenstück zu einem Reflex, der den Untergrund detektiert, ist ein Reflex, der das Fehlen des „erwarteten“ Untergrunds detektiert. Tritt ein Bein „unerwartet“ in eine Lücke im Untergrund, befindet sich der Läufer in einer kritischen Situation.

Im Tripod, der schnellsten Gangart eines sechsbeinigen Läufers, wird die kritische Situation besonders deutlich. In diesem Laufmuster befinden sich benachbarte Beine durchgängig in entgegengesetzten Phasen. Beginnt ein Bein mit der Stemmphase, beginnen seine

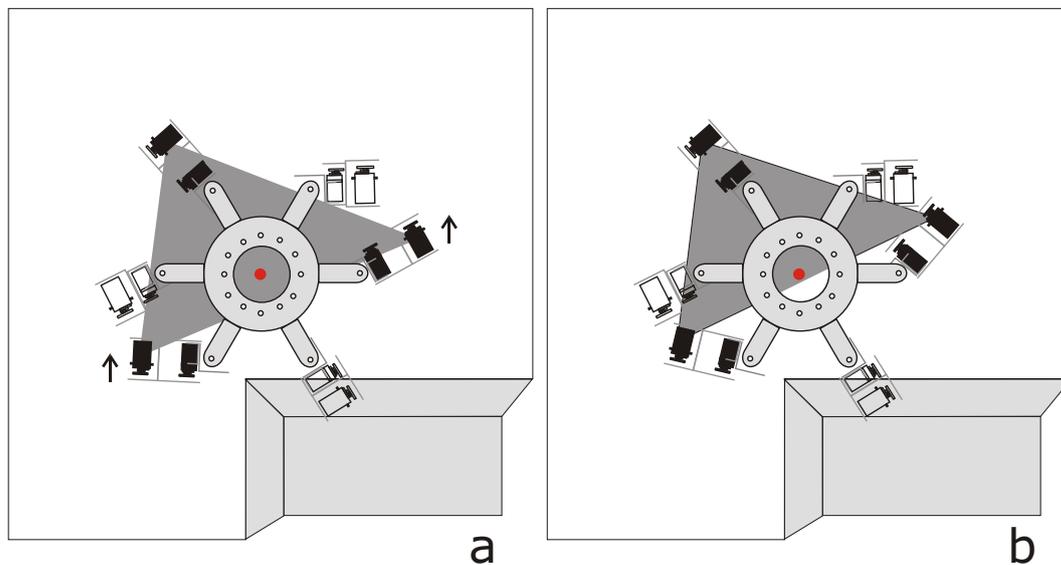


Abbildung 5.21: Schematische Darstellung der Stützpolygonveränderung. Roboter von oben mit Laufrichtung zum unteren Bildrand. Die Beine in der Schwingphase sind transparent und Beine in der Stemmphase schwarz dargestellt. Ein ausgefüllter roter Kreis markiert den Masseschwerpunkt der Maschine. Ein graues Dreieck repräsentiert das Stützpolygon. a) Bein vorne links tritt in eine Vertiefung. Schwarze Pfeile an den Beinen vorne rechts und in der Mitte links deuten die Verlängerung der Stemmphase an. b) Resultat der Stemmphasenverlängerung mit Änderung des Stützpolygons.

Nachbarbeine mit der Schwingphase und umgekehrt. Erreicht ein Bein im Tripod das Ende seiner Schwingphase, so erreichen seine Nachbarbeine das Ende ihrer Stemmphase. Zum Ende der Stemmphase befinden sich die Beine in ihren PEPs und sollten in die Schwingphase wechseln. Detektiert das schwingende Bein keinen Untergrund, dürfen die direkten Nachbarbeine nicht in die Schwingphase wechseln, und die Stemmphase muss verlängert werden. Eine Verlängerung der Stemmphase wird durch das posteriore Verschieben der PEPs erreicht. Werden die PEPs der stemmenden Beine über ihren ursprünglichen Wert hinaus nach hinten verschoben, ohne dass das schwingende Bein Bodenkontakt detektiert, verschiebt sich auch die Grenze des Stützpolygons weiter. Die Grenze zwischen den stemmenden Beinen wird in Richtung des projizierten Körperschwerpunkts des Läufers verschoben. Diese Verschiebung kann zu einer Gefährdung der Stabilität des Läufers führen. Abbildung 5.21 stellt diese Situation schematisch dar.

Auf eine fehlende Untergrunddetektion reagieren Insekten mit einer Suchbewegung der Beine. Nach Verlust des Bodenkontakts auf rutschigem Untergrund führen Schaben eine Suchbewegung mit dem entsprechenden Bein aus [117, 118]. Die Bewegungsanalysen verschiedener biologischer Studien beziehen kleine Lücken im Untergrund mit ein [17, 18, 27, 91, 120, 121]. Pearson und Franklin beschreiben dabei die Suchbewegung

des Beins bei Heuschrecken. Dürr veröffentlichte 2001 eine Studie über die Kinematik stereotyper Suchbewegungen in Beinen von Stabheuschrecken. Auch in [29] wird auf die Suchbewegung der Beine bei Stabheuschrecken eingegangen.

Angelehnt an die biologischen Untersuchungen und Beobachtungen kann zur Vorbeugung des Stabilitätsverlusts ein Suchreflex eingesetzt werden. Der Suchreflex sollte direkt im Anschluss an die Schwingphase erfolgen und zu einem kontinuierlichen Übergang von der Schwing- in die Suchphase führen. Als Reiz wird hier die Streckung des Beins über einen vordefinierten Winkel hinaus interpretiert. Dazu kann ein zusätzlicher Zielpunkt unterhalb der AEP für die Schwingphase eingeführt werden. Die Schwingphase wird nach dem Erreichen der AEP zu diesem Endpunkt weiter durchgeführt. Die maximale Streckung in β - und γ -Gelenk über das Erreichen der AEP hinaus stellt somit den Reiz dar. Die Reaktion ist eine stereotype Suchbewegung vor und hinter der ursprünglichen AEP. Eine schematische Darstellung des Suchreflexes ist in Abbildung 5.22 dargestellt.

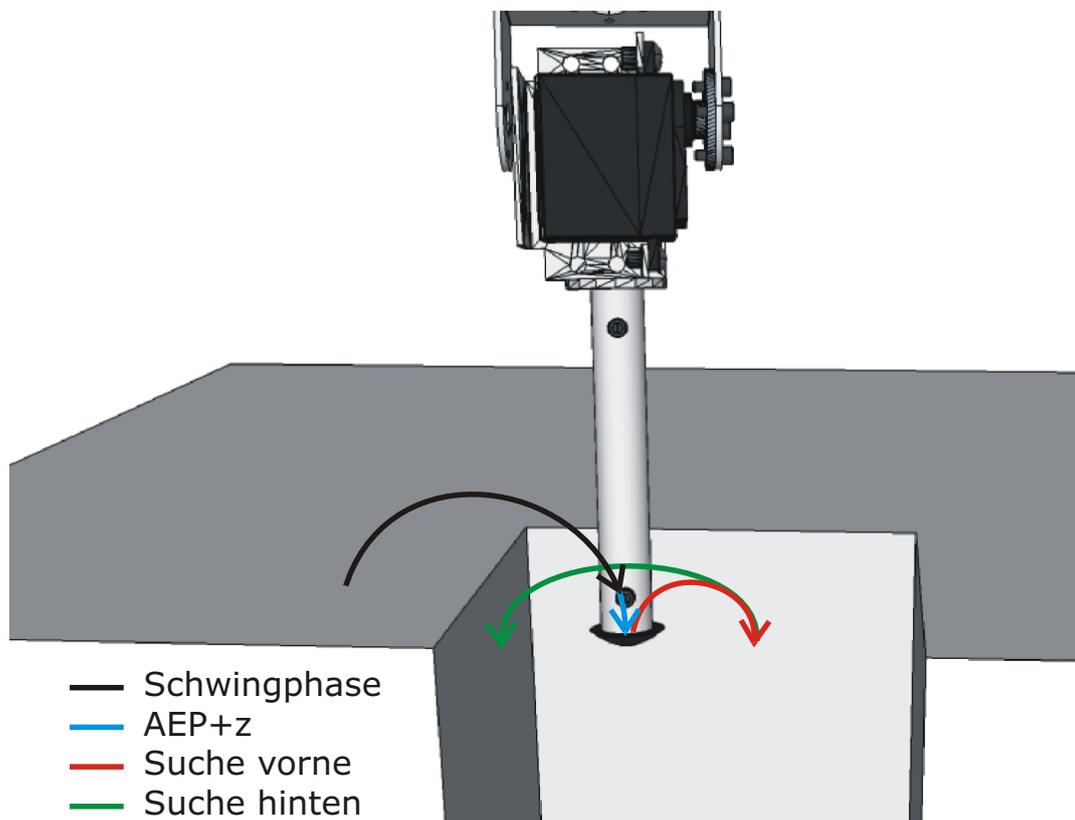


Abbildung 5.22: Schematische Darstellung der Suchphase für ein Bein. Ein schwarzer Pfeil markiert die Schwingphase. Ein blauer Pfeil deutet die Differenz zwischen AEP und maximaler Streckung an. Ein roter Pfeil repräsentiert das Suchen nach vorne. Ein grüner Pfeil gibt die anschließende Suche nach hinten an.

5.3.7.1 Implementierung

Der Suchreflex ist als Erweiterung der Schwingphase implementiert und wird in die Schwing-BCU integriert. Ausgelöst wird der Suchreflex durch die Überschreitung vordefinierter Winkelwerte im β - und γ -Gelenk. Diese entsprechen einer Streckung des Beins über die normale AEP hinaus.

Der Suchreflex entspricht bei der Stabheuschrecke *Carausius morosus* einem stereotypen Bewegungsablauf [27]. Angelehnt an den biologischen Ablauf wird in dieser Arbeit ein stereotyper Bewegungsablauf als Reaktion auf eine Beinstreckung implementiert. Dieser Ablauf kann durch einen Moore-Automaten mit drei Zuständen beschrieben werden. In jedem Zustand wird ein eigener Bewegungsablauf als Ausgabe durchgeführt: „Suche vorne“, „Suche hinten“ und „Stoppe Laufen“. Als Eingaben dienen die Streckung des Beins, repräsentiert durch vordefinierte Winkelwerte für das β - und das γ -Gelenk, und der Bodenkontakt. In Abbildung 5.23 ist dieser Automat dargestellt. Die Zustände sind hier mit ihren Ausgaben betitelt. Die Transitionen sind mit zwei binären Werten beschriftet, wobei der linke Wert die Streckung und der rechte Wert den Bodenkontakt kodiert. Der Wert 1 entspricht in beiden Fällen einer Detektion.

Eingabe: Streckung, Bodenkontakt
Ausgabe: stereotyper Bewegungsablauf

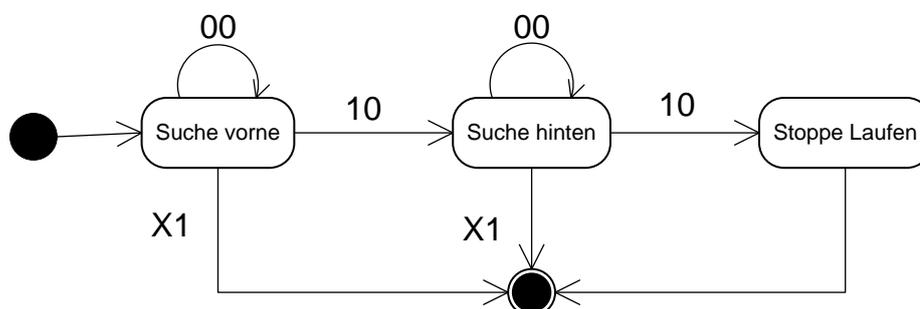


Abbildung 5.23: Suchreflex-Automat: Zustände geben stereotype Bewegungsabläufe aus. Zwei Eingaben: links Detektion maximaler Beinstreckung, rechts Detektion Bodenkontakt. Der Wert 1 entspricht einer Detektion.

Im Zustand „Suche vorne“ wird, von der aktuellen Position ausgehend, das Bein angehoben, in anteriore Richtung bewegt und wieder abgesenkt. Wird während der Bewegung Bodenkontakt detektiert, wird immer in den Endzustand des Automaten gewechselt. Solange keine Detektion stattfindet, wird die Bewegung weiter ausgeführt. Wird eine vordefinierte Streckung detektiert, wechselt der Automat in den Zustand „Suche hinten“.

Im Zustand „Suche hinten“ wird von der aktuellen Position ausgehend das Bein angehoben, in posteriore Richtung bewegt und wieder abgesenkt. Hier gelten dieselben Bedingungen für die Transitionen, wie sie im Zustand „Suche vorne“ beschrieben wurden. Die

Bewegung wird so lange ausgeführt, bis entweder Bodenkontakt oder eine vordefinierte Streckung detektiert wird. Nach einer Bodenkontaktdetektion wechselt der Automat in den Endzustand. Wird eine Streckung detektiert, wechselt der Automat in den Zustand „Stoppe Laufen“.

In dem Zustand „Stoppe Laufen“ wird die gesamte Maschine gestoppt, um zu verhindern, dass der projizierte Masseschwerpunkt das Stützpolygon verlässt und dass die stemmenden Beine die Maschine weiter auf die detektierte Lücke zubewegen.

Die Zustände „Suche vorne“ und „Suche hinten“ übergeben bei einem Zustandswechsel jeweils die aktuellen Gelenkwinkel. Bei dem Wechsel von „Stoppe Laufen“ in den Endzustand wird zusätzlich die Laufgeschwindigkeit für alle Beine auf 0 gesetzt. Führt ein Bein einen Suchreflex aus, wird allen stemmenden Beinen ein Wechsel in die Schwingphase verboten. Schwingende Beine dürfen ihre Schwingphase beenden. Für den Fall, dass der Suchreflex zu viel Zeit in Anspruch nimmt, führt die beschriebene Einschränkung zum Stopp des Laufverhaltens. So wird verhindert, dass sich der Roboter weiter auf eine eventuelle Lücke zubewegt.

5.3.7.2 Experimentelle Ergebnisse

Für die Evaluation des implementierten Suchreflexes läuft der Roboter über das oben beschriebene Testgelände. Während des gesamten Laufs werden Winkelposition und Stromverbrauch für jedes der 18 Gelenke für eine spätere Untersuchung auf ausgelöste Suchreflexe aufgenommen. Der hier beschriebene Suchreflex kann in drei Varianten vorkommen:

1. Bodendetektion im Zustand „Suche vorne“
2. Bodendetektion im Zustand „Suche hinten“
3. Keine Bodendetektion

In diesem Abschnitt wird exemplarisch ein Ausschnitt über neun Sekunden entsprechend der Variante 2 aus den aufgenommenen Daten analysiert und ausgewertet. Beispiele für Variante 1 und 3 sind im Abschnitt A.3 im Anhang zu finden.

Abbildung 5.24 zeigt den Kurvenverlauf der Winkel α , β und γ in Radiant und den Stromverbrauch der drei Gelenke in Prozent über die Zeit in Sekunden. Zusätzlich sind die berechneten Schwellwerte in den Absenkphasen der Bewegungsabläufe für das β -Gelenk eingezeichnet. Der Kurvenverlauf der Schwingphase ist hier mit I) gekennzeichnet. Der Bewegungsablauf „Suche vorne“ wird hier mit II) betitelt und ist mit einem violetten Farbton hinterlegt. Der Bewegungsablauf „Suche hinten“ wird hier mit III) bezeichnet und ist mit einem blauen Farbton hinterlegt.

I) Schwingphase: Die Absenkphase der Schwingphase dauert von Sekunde 5,3 bis Sekunde 6,3 an. Zum Ende der Schwingphase erreichen beide Winkel einen Wert von über 2. In der Absenkphase überschreitet der Stromverbrauch des β -Gelenks den für die Bodendetektion berechneten Schwellwert nicht. Der α -Winkelwert steigt von 0,4 bis etwa 1,6 an.

II) Suche vorne: Phase II beginnt bei Sekunde 6,3 und endet bei Sekunde 8,4. Innerhalb dieser zwei Sekunden bewegen sich die Gelenke β und γ , ähnlich der Schwingphase, in einer parabelähnlichen Form. Dabei starten die Winkel bei einem Wert von etwa 2,2, erreichen den Scheitelpunkt bei einem Wert von ungefähr 1,2 und enden bei ihren Startwerten von 2,2. In der Absenkphase wird der berechnete Schwellwert zur Bodendetektion von dem Stromverbrauch des β -Gelenks nicht überschritten. Die Werte der α -Kurve halten sich bis Sekunde 6,5 konstant bei einem Wert von 1,6. Von Sekunde 6,5 bis Sekunde 7,1 fällt der Wert auf 1,9 ab. Von da an bleibt der Wert bis zum Ende von Phase II konstant.

Startwinkel Schwingphase: $\alpha:0,4$; $\beta:1,6$; $\gamma: 1,6$

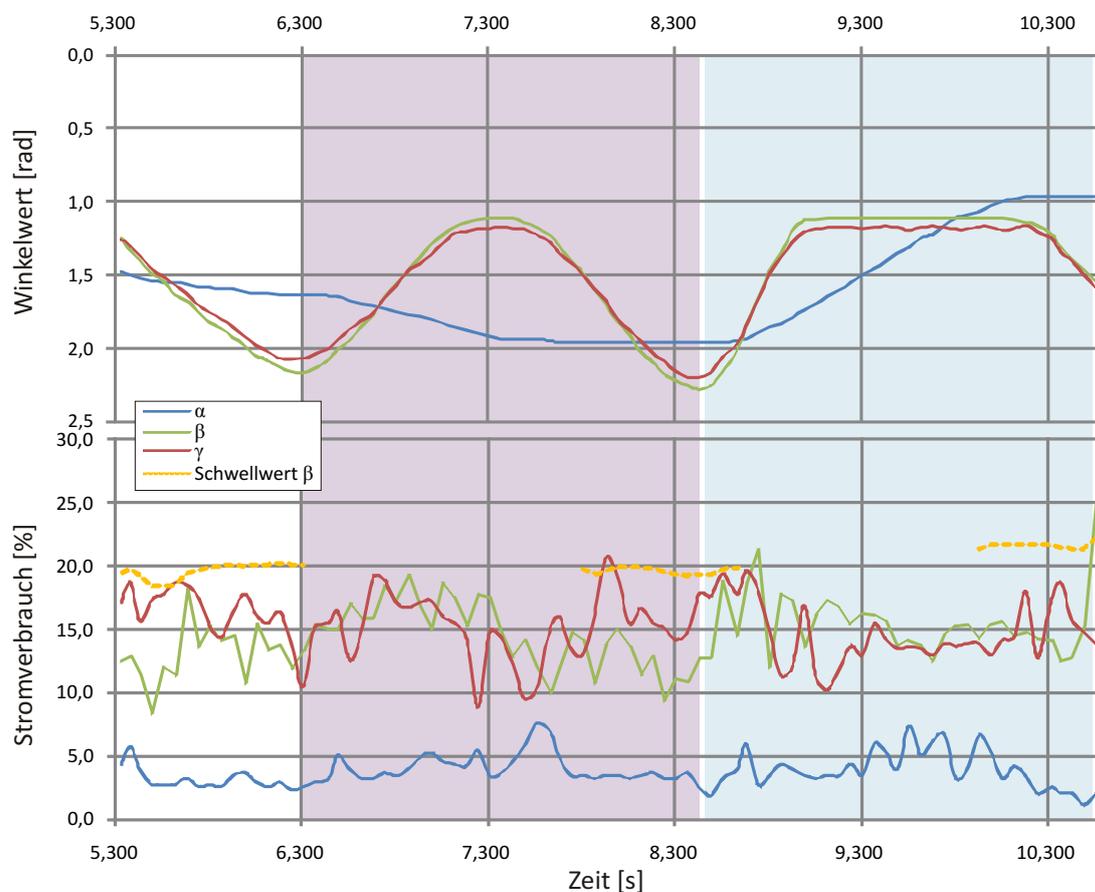


Abbildung 5.24: Ergebnis Suchphasenexperiment: Winkelwerte der Gelenke α , β und γ und Stromverbrauch in % über die Zeit. Die Phase „Suche vorne“ ist violett und „Suche hinten“ blau hinterlegt. Die Startwinkel der Schwingphase sind: $\alpha: 0,4$; $\beta: 1,6$; $\gamma: 1,6$.

III) Suche hinten: Phase III beginnt bei Sekunde 8,4 und endet mit Sekunde 10,5. Von Sekunde 8,4 bis Sekunde 8,9 fallen die Winkelwerte der Gelenke β und γ von den Werten 2,3 und 2,2 auf die Werte 1,2 und 1,3 ab. Bis Sekunde 10,2 bleiben die Werte

konstant und erreichen bei Sekunde 10,5 den Wert 1,6. Bei Sekunde 10,5 überschreitet der Stromverbrauch des β -Gelenks den berechneten Schwellwert für die Bodendetektion. Der α -Wert bleibt bis Sekunde 8,7 konstant und fällt anschließend bis Sekunde 9,8 auf den Wert 0,9 ab. Bis zum Ende von Phase III bleibt der α -Wert konstant.

5.3.7.3 Auswertung

Die steigenden Werte im α -Winkel entsprechen hier einer Protraktion und die fallenden Werte einer Retraktion. Der eigentliche Endpunkt der Schwingphase im β - und γ -Gelenk liegt bei etwa 1,6. Dies entspricht der Endposition der vorhergegangenen Stemmphase und somit auch dem letzten Bodenkontakt. Die steigenden Werte in den Winkelkurven für β und γ entsprechen dem Senken des Beins durch das β - beziehungsweise dem Strecken des Beins durch das γ -Gelenk. Bei Sekunde 5,6 erreichen die Kurven ihren Startwert von 1,6. Der Stromverbrauch des β -Gelenks überschreitet allerdings nicht den in der Absenkphase berechneten Schwellwert für die Bodendetektion. Die Schwingphase wird weiter durchgeführt, bis bei Sekunde 6,3 eine maximale Streckung des β - und γ -Gelenks erreicht wird. Diese Streckung löst den Suchreflex aus.

An den fallenden Werten im α -Gelenk kann die „Suche vorne“ Bewegung abgelesen werden. Das α -Gelenk erreicht bei Sekunde 7,6 die maximale Grenze seines Arbeitsbereichs und kann das Bein nicht weiter in anteriore Richtung bewegen. Während dieser ersten Phase des Suchreflexes führen β - und γ -Gelenk eine Art kleine Schwingphase aus, in der das Bein erneut angehoben und wieder abgesenkt wird. Während der Absenkphase wird erneut der Schwellwert für die Bodendetektion berechnet. Da der Schwellwert des Stromverbrauchs im β -Gelenk nicht überschritten wird, folgt die Aktivierung des Zustands „Suche hinten“.

In Phase III) fallen die Werte des α -Gelenks bis kurz vor die Startposition der Schwingphase auf 0,9. Die Differenz zur Startposition der Schwingphase, der PEP, beträgt 0,4. Das entspricht gut einem Drittel der normalen Schrittlänge von 1,2. Der Übergang von dem Winkelwert 1,9 zu dem Winkelwert 0,9 benötigt mehr Zeit als das Heben und Senken des Beins durch β - und γ -Gelenk. Das erklärt die konstanten Werte in beiden Kurven, da das Bein nicht vorzeitig wieder abgesenkt werden soll. Mit dem Überschreiten des Stromverbrauchs bei Sekunde 9 detektiert das Bein Bodenkontakt und kann die Suchphase beenden.

Das hier vorgestellte Ergebnis zeigt die korrekte Funktion des Suchreflexes. Durch den Suchreflex können erfolgreich Lücken im Untergrund erkannt und es kann auf diese reagiert werden. In unebenem Gelände ist dies eine der wichtigsten Fähigkeiten für eine Laufmaschine. Die Variabilität des Suchreflexes ist abhängig von der aktuellen Schwingphase. Reizt die implementierte Schwingbewegung bereits den vollen Arbeitsbereich des Beins aus, kann der Suchreflex nicht sinnvoll eingesetzt werden. Auch die Anatomie des Beins beeinflusst durch Schritthöhe, -weite und Bewegungsspielraum den Suchreflex.

5.3.8 Levatorreflex

Der Levatorreflex wird bei dem Kontakt mit einem Hindernis während der Schwingphase ausgelöst und bewirkt eine zusätzliche Levation im Bein.

Für das Laufen in unebenem Gelände spielt neben der Bodendetektion und der Lückendetektion auch die Hindernisdetektion eine große Rolle. Die Hindernisdetektion beschränkt sich auf die Schwingphase. Aus der Perspektive der Stabilitätssicherung dient die Schwingphase hauptsächlich dazu, das Bein möglichst schnell und reibungslos in die AEP zu bewegen und somit wieder in die Stemmphase zu wechseln. Wird der Wechsel in die Stemmphase verzögert, entsteht eine ähnliche Problematik wie bei nicht detektiertem Untergrund (Abbildung 5.21). Der projizierte Masseschwerpunkt des Roboters verschiebt sich in Richtung der Grenze des Stützpolygons. Dadurch wird die statische Stabilität gefährdet. Stößt

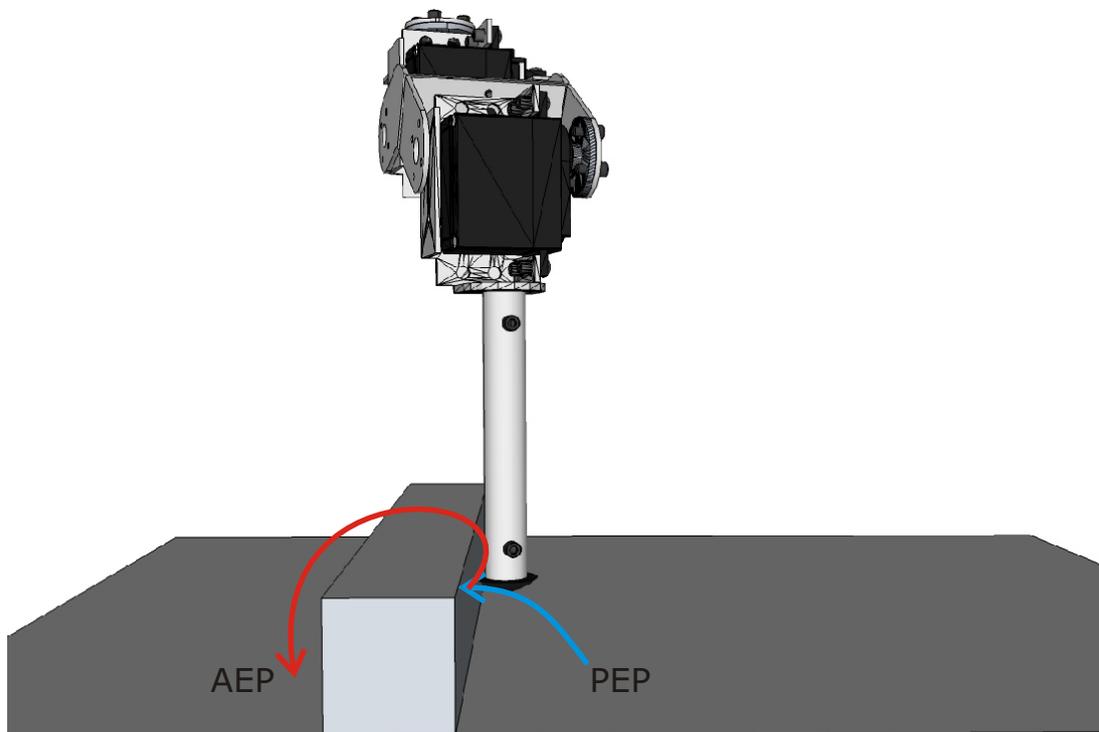


Abbildung 5.25: Schematische Darstellung des Levatorreflexes. Die Schwingphase von der PEP zu der AEP wird durch einen blauen Pfeil und die Reflexreaktion durch einen roten Pfeil markiert.

ein Bein in der Schwingphase an ein Hindernis, wird diese Problematik durch eine entgegen der Laufrichtung wirkenden Kraft ergänzt. Ein Bein, das in der Schwingphase gegen ein Hindernis drückt, wirkt den stemmenden Beinen entgegen. Der Hinderniskontakt sollte direkt aufgehoben und die Schwingphase korrigiert werden.

Ein entsprechender Reflex wurde bereits 1940 von Pringle [94] bei Schaben entdeckt. Auch bei Heuschrecken wurde der Reflex beschrieben [23] und untersucht [52, 110]. In allen Untersuchungen wurde dieselbe Reaktion beobachtet. Das Bein korrigiert bei einem Hinderniskontakt seine Schwingphase durch eine zusätzliche Levation.

Der Reiz entspricht der Detektion eines Hindernisses. Als Reaktion wird ein stereotyper Bewegungsablauf ausgelöst. Eine schematische Darstellung des Levatorreflexes ist in Abbildung 5.25 zu sehen. Das hier dargestellte Bein führt eine Schwingphase aus, die hier mit einem blauen Pfeil angedeutet wird. Das Bein stößt gegen ein Hindernis und der Reflex wird ausgelöst. Der rote Pfeil beschreibt die Trajektorie des Fußpunkts während des Levatorreflexes.

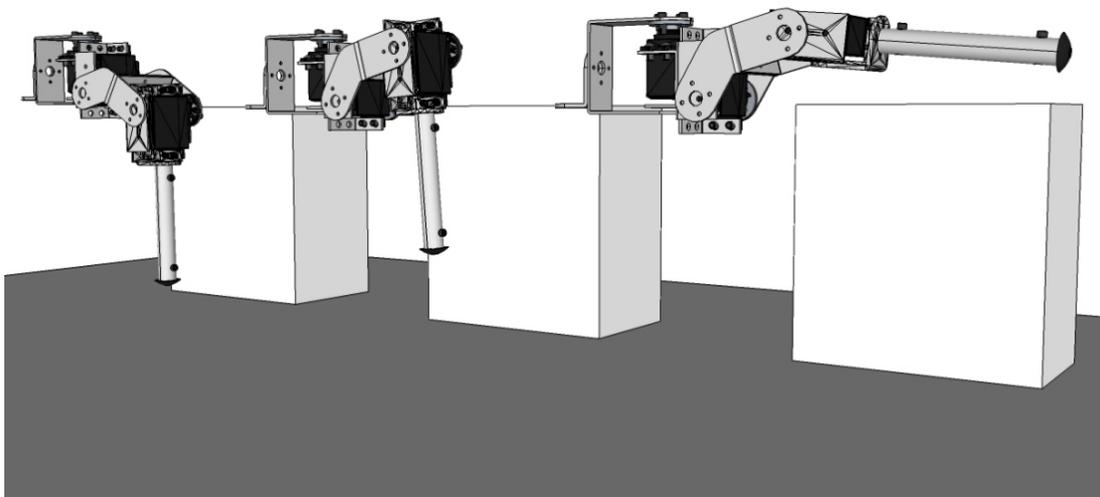


Abbildung 5.26: Schematische Darstellung des Levatorreflexes. Links: Bein stößt in der Schwingphase gegen ein Hindernis. Mitte: „Levation“ - Bein wird weiter angehoben und stößt erneut gegen das Hindernis. Rechts: „Extension“ - γ -Gelenk streckt das Bein vom Körper weg. Das Hindernis kann überwunden werden.

Auch hier kann die Reizwahrnehmung durch die Beobachtung des Stromverbrauchs während der Schwingphase stattfinden. In diesem Fall ist der Stromverbrauch im α -Gelenk ausschlaggebend. Stößt das Bein während der Schwingphase gegen ein Hindernis, steigt der Stromverbrauch im α -Gelenk.

Die Reaktion entspricht einem festen Bewegungsablauf und gliedert sich in drei Phasen: I) die Levation des Beins, II) die Extension des Beins und III) das Stoppen des Laufverhaltens. Abbildung 5.26 zeigt ein Bein in drei Situationen mit einem hohen Hindernis. Von links nach rechts ist das Bein in verschiedenen Phasen gezeigt. Links stößt das Bein während der Schwingphase gegen ein Hindernis. In der Mitte wird Phase I (die Levation) ausgeführt, und das Bein wird weiter angehoben. Stößt das Bein in Phase I) erneut an das Hindernis, folgt Phase II (die Extension). In der Extension wird das Bein durch das

γ -Gelenk waagrecht vom Körper weggestreckt, und das Bein versucht nochmals das Hindernis zu überwinden. Stößt das Bein in Phase II an ein Hindernis, wird das Laufverhalten gestoppt. Stößt das Bein während seiner Schwingphase gegen ein Hindernis, wird Phase I ausgelöst. In dieser Phase bewegt sich das α -Gelenk zurück in seine Startposition. Das Bein wird dadurch auf seiner aktuellen Höhe zurück bewegt. Von dieser Position wird eine Schwingphase mit einer höheren Levation ausgeführt.

Stößt das Bein während dieser Schwingphase erneut gegen ein Hindernis, wird Phase II ausgelöst. Das Bein bewegt sich wieder zurück und führt eine Extension aus. Mit dem ausgestreckten Bein wird erneut eine Schwingphase ausgelöst. Stößt das Bein in dieser Phase nochmals gegen das Hindernis, wird der Reflex abgebrochen. Das Bein bewegt sich zurück zu seiner ursprünglichen PEP und setzt den Fuß auf dem Untergrund ab.

5.3.8.1 Implementierung

Der Levatorreflex ist als Erweiterung der Schwingphase in die Schwing-BCU integriert. Während der gesamten Schwingphase werden die Stromwerte im α -Gelenk mit einem vordefinierten Schwellwert verglichen. Mit der Überschreitung des Schwellwerts wird der stereotype Bewegungsablauf ausgelöst. Der Ablauf kann durch einen Automaten mit drei Zuständen beschrieben werden. In jedem Zustand führt der Automat als Ausgabe einen Bewegungsablauf aus. Die Ausgabe entspricht in jedem Zeitschritt, abhängig vom jeweiligen Bewegungsablauf, einer Aktualisierung der Winkelwerte für α , β und γ . Die Zustände sind mit den entsprechenden Charakteristika ihrer Bewegungsabläufe betitelt: „Levation“, „Extension“ und „Stoppe Lauf“. Als Eingaben akzeptiert der Automat die Hindernisdetektion und die Bodendetektion. Für beide Eingaben gilt der Wert 1 als wahr, respektive Detektion, und 0 als nicht wahr, beziehungsweise keine Detektion. Der Automat ist in Abbildung 5.27 dargestellt.

Im Zustand „Levation“ wird die Levation im β -Gelenk und die Flexion im γ -Gelenk gestoppt und das α -Gelenk bewegt sich zurück zu seinem PEP-Wert. Dieser entspricht der Startposition dieser Schwingphase für das α -Gelenk. Mit dem Erreichen des PEP-Wertes wird von dieser Position eine Schwingphase ausgeführt. Dabei werden die Winkelwerte für die Levation im β -Gelenk und proportional die Winkelwerte für die Flexion im γ -Gelenk maximiert. Die Zielposition der Schwingphase, die AEP, bleibt unverändert, sodass die Schwingphase von einer höheren Position startet als sie endet. Wird während der neuen Schwingphase erneut ein Hindernis detektiert, wechselt der Automat in den Zustand „Extension“.

Im Zustand „Extension“ wird die Schwingphase erneut gestoppt und das α -Gelenk bewegt das Bein nochmals zurück zur Ausgangsposition der aktuellen Schwingphase. Das β -Gelenk führt bereits die maximale Levation aus. Das γ -Gelenk aktualisiert den Winkelwert zu einer Extension. Das Bein wird gestreckt und zeigt jetzt waagrecht vom Körper weg (siehe dazu Abbildung 5.26 rechts). Im Anschluss führt das α -Gelenk eine Protraktion aus und die Gelenke β und γ nehmen wieder ihre ursprünglichen Winkelwerte ein. In diesem Zustand wird die Hindernisdetektion auf die Auswertung des Stromverbrauchs im γ -Gelenk erweitert. Wenn bei der Flexion des γ -Gelenks der Stromverbrauch einen vorde-

finierten Schwellwert überschreitet, wird dies als Hindernisdetektion interpretiert. Dieser Fall kann eintreten, wenn sich das Bein gestreckt über einem Hindernis befindet und die Flexion startet.

Eingabe: Hindernisdetektion, Bodenkontakt
 Ausgabe: stereotyper Bewegungsablauf

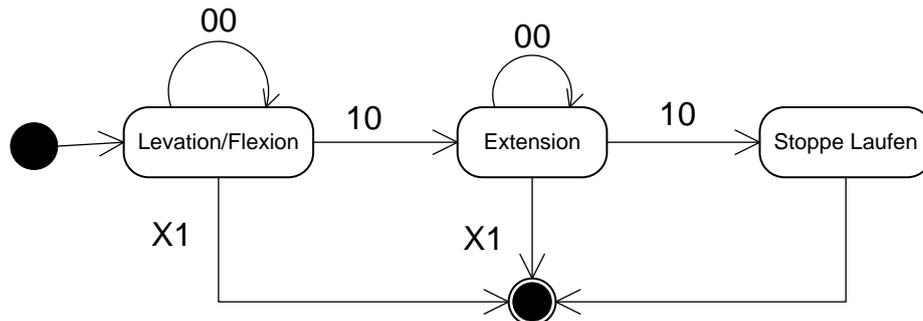


Abbildung 5.27: Levatorreflex als Moore-Automat mit drei Zuständen. Die Zustände geben als Ausgaben stereotype Bewegungsabläufe des Reflexes aus. Die Eingaben entsprechen der Hindernisdetektion und der Bodendetektion.

Wird im Zustand „Extension“ das Hindernis durch das α - oder durch das γ -Gelenk detektiert, wechselt der Automat in den Zustand „Stoppe Laufen“.

In dem Zustand „Stoppe Laufen“ wird das Bein zurück in die ursprüngliche PEP bewegt und das Laufverhalten der Maschine wird gestoppt.

Die Zustände „Levation“ und „Extension“ übergeben bei einem Zustandswechsel jeweils die aktuellen Gelenkwinkel. Bei dem Wechsel von „Stoppe Laufen“ in den Endzustand wird zusätzlich die Laufgeschwindigkeit für alle Beine auf 0 gesetzt. Das Stoppen des Laufverhaltens verhindert, dass die Maschine sich weiter auf das Hindernis zubewegt.

Führt ein Bein den Levatorreflex aus, wird allen stehenden Beinen ein Wechsel in die Schwingphase verboten. Schwingende Beine dürfen ihre Schwingphase beenden. Für den Fall, dass der Levatorreflex zu viel Zeit in Anspruch nimmt, führt die beschriebene Einschränkung zum Stopp des Laufverhaltens. So wird verhindert, dass sich der Roboter weiter auf das detektierte Hindernis zubewegt.

5.3.8.2 Experimente und Ergebnisse

Für die Untersuchung des implementierten Levatorreflexes wurde der Stromverbrauch in den α -Gelenken von drei Beinen während einer Schwingphase ohne Hinderniskontakt ausgewertet. Basierend auf diesen Messungen ist der Schwellwert für das α -Gelenk auf einen festen Wert von 47 % gesetzt.



Abbildung 5.28: Testgelände zur Evaluation des Levatorreflexes mit der Startposition der Roboterplattform. Dieses Gelände unterscheidet sich von dem Testgelände für Bodendetektion durch eine andere Anordnung der Kanthölzer und einer größeren Zahl von Hindernissen.

Für die Evaluation der Implementierung läuft die Roboterplattform über ein speziell präpariertes Testgelände. Das Testgelände ist wie in Abbildung 5.28 abwechselnd aus $2,5\text{ cm}$ und $5,0\text{ cm}$ hohen Blöcken aufgebaut.

Durch die wechselnden Höhen der Kanthölzer wird der Levatorreflex häufig ausgelöst. Während des gesamten Laufs werden der Winkelwert und der Stromverbrauch für jedes Gelenk aufgezeichnet und anschließend auf ausgelöste Levatorreflexe untersucht. Der hier beschriebene Levatorreflex kann in drei Variationen auftreten:

1. Bodendetektion im Zustand „Levation“
2. Bodendetektion im Zustand „Extension“
3. Keine Bodendetektion

In diesem Abschnitt wird exemplarisch ein Ausschnitt über 8 Sekunden aus den aufgezeichneten Daten analysiert und ausgewertet. Der im Folgenden untersuchte Ausschnitt entspricht der Variation 2 „Bodenkontakt im Zustand Extension“.

Abbildung 5.29 zeigt den Kurvenverlauf der Winkel α , β und γ in Radiant über die Zeit in Sekunden und den Stromverbrauch der drei Gelenke in Prozent über die Zeit in Sekunden. Zusätzlich ist der Schwellwert im Stromverbrauch des α -Gelenks für die Hindernisdetektion eingezeichnet. Die berechneten Schwellwerte in den Absenckphasen der Bewegungsabläufe für das β -Gelenk sind ebenfalls angegeben. Der Kurvenverlauf der Schwingphase wird im weiteren Verlauf mit I) gekennzeichnet. Der Bewegungsablauf „Levation“ wird hier mit II) betitelt und ist mit einem violetten Farbton hinterlegt. Der Bewegungsablauf „Extension“ wird hier mit III) bezeichnet und ist mit einem blauen Farbton hinterlegt.

I) Schwingphase: Die Schwingphase beginnt bei $0,1$ Sekunden und dauert bis Sekunde $2,9$ an. In dem Winkeldiagramm fallen die Werte für β und γ in dieser Zeitspanne von $1,7$ auf $1,1$ ab. Der Winkelwert für das α -Gelenk steigt gleichzeitig von $1,1$ auf $1,5$ an.

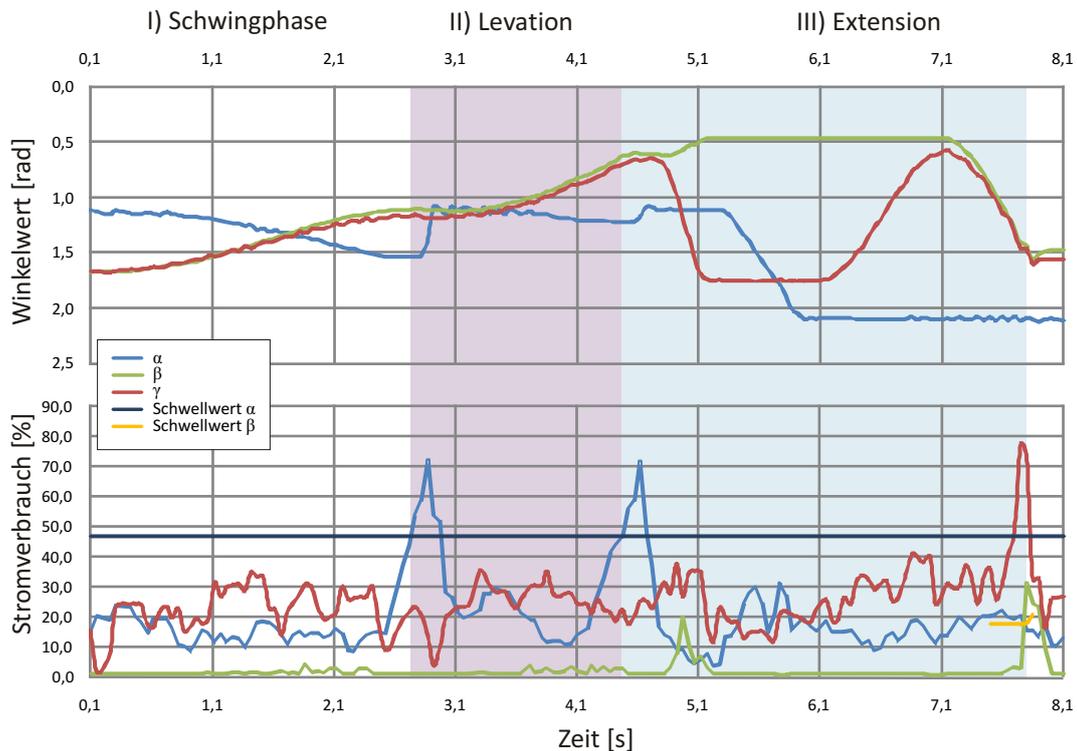


Abbildung 5.29: Messdaten Levatorreflex. Für die Gelenke α , β und γ sind die Winkelwerte und der Stromverbrauch in % über die Zeit in Sekunden aufgetragen. Zusätzlich ist der Schwellwert für die Bodendetektion und für die Hindernisdetektion eingetragen. Violett: Levation; Blau: Extension.

Die Stromverbräuche der einzelnen Gelenke schwanken für das α -Gelenk zwischen 8 % und 24 %, für das β -Gelenk zwischen 0 % und 4 % und für das γ -Gelenk zwischen 0 % und 35 %. Bei Sekunde 8 steigt der Stromverbrauch im α -Gelenk auf 72 % an und überschreitet den Schwellwert von 47 % für den Stromverbrauch im α -Gelenk.

II) Levation: Die Levation beginnt bei Sekunde 2,9 und endet bei Sekunde 4,5. Der Winkelwert des α -Gelenks fällt von 1,5 auf 1,1 ab und steigt anschließend bis zum Ende von Phase II auf 1,2 an. Die Winkelwerte für das β - und γ -Gelenk bleiben bis Sekunde 3,5 konstant bei einem Wert von 1,5 und fallen von da an bis zum Ende von Phase II auf den Wert von 0,7 ab.

Die Werte im Stromverbrauch schwanken für die Gelenke β zwischen 0 % und 3 % und für γ zwischen 3 % und 35 %. Der Stromverbrauch für das α -Gelenk fällt zu Beginn der Phase II von 72 % auf 20 % ab. Anschließend fällt der Wert erneut auf 10 % ab und überschreitet zum Ende von Phase II den Schwellwert von 47 %.

III) Extension: Die Extension beginnt bei Sekunde 4,5 und endet bei Sekunde 7,8. Die Winkelwerte beschreiben für jedes Gelenk eine individuelle Kurve. Die Werte für das α -Gelenk fallen in Sekunde 4,6 von 1,2 auf 1,1 ab. Bis Sekunde 5,3 bleibt der Wert

konstant und steigt von da an bis Sekunde 5,9 auf 2,1 an. Bis zum Ende von Phase III bleibt der α -Wert konstant bei 2,1. Der Winkelwert für das β -Gelenk bleibt bis Sekunde 4,8 konstant bei 0,6, fällt bis Sekunde 5,1 auf 0,5 ab und bleibt von da an bis Sekunde 7,2 konstant. Von Sekunde 7,2 bis zum Ende von Phase III bei Sekunde 7,8 steigt der Wert auf 1,6 an.

Der Winkelwert für das γ -Gelenk fällt zu Beginn der Phase III auf 0,7 ab. Bis Sekunde 5,1 steigt der γ -Wert auf 1,8 und bleibt bis Sekunde 6,2 konstant. Von Sekunde 6,2 bis zum Ende von Phase III folgt der Winkelwert einer parabelähnlichen Kurve über einen Scheitelpunkt von 0,6 bei Sekunde 7,1.

Der Stromverbrauch im α -Gelenk fällt zu Beginn von Phase III auf unter 10% ab. Bis zum Ende von Phase III schwanken die Werte im Stromverbrauch für das α -Gelenk zwischen 5% und 30%. Der Stromverbrauch im β -Gelenk bleibt überwiegend konstant zwischen 1% und 2%. Bei Sekunde 4,9 steigt er kurzzeitig auf 20% und fällt direkt wieder ab. Zum Ende der Phase steigt der Stromverbrauch über den berechneten Schwellwert für die Bodendetektion. Der Stromverbrauch im γ -Gelenk schwankt während der gesamten Phase III zwischen 11% und 41%. Zum Ende der Extensionsphase, bei Sekunde 7,7, steigt der Stromverbrauch im γ -Gelenk kurzzeitig auf 77%.

5.3.8.3 Auswertung

Die Hindernisdetektion im Zustand „Levation“ löst den Wechsel in den Zustand „Extension“ aus. Der Zustand „Extension“ ist ein letzter Versuch, das Hindernis zu passieren, gleichzusetzen. Durch das Ausstrecken des Beins wird versucht, das detektierte Hindernis, wie in Abbildung 5.26 rechts, zu überwinden. Dazu wird das α -Gelenk zurück in die Ausgangsposition bei einem Winkel von 1,1 bewegt und anschließend das β -Gelenk in eine maximale Levation und das γ -Gelenk in die Extension bewegt. Diese Bewegungen werden bis Sekunde 5,1 ausgeführt. Das β -Gelenk erreicht hier die maximale Levation mit einem Winkelwert von 0,5. Das γ -Gelenk erreicht die Extension bei einem Winkelwert von 1,8.

Maximal angehoben und ausgestreckt wird das Bein vom α -Gelenk in Richtung AEP, bei einem α -Wert von 2,1, bewegt. Ab Sekunde 6,2 wird das γ -Gelenk wieder gebeugt. Die Flexion wird bis zu dem Winkelwert von 0,6 durchgeführt. Bei Sekunde 7,2 entspricht die Beinhaltung einem Bein, das bis zu seiner Maximalstellung angewinkelt ist. Von dieser Beinhaltung aus wird das Bein wie zum Ende einer Schwingphase abgesenkt. In der Absenkphase wird für das β -Gelenk der Schwellwert für die Bodendetektion berechnet. Dieser Schwellwert wird von dem Stromverbrauch im β -Gelenk bei Sekunde 7,8 überschritten. Die Überschreitung wird als Bodenkontakt interpretiert. Damit werden der Levatorreflex und die Schwingphase beendet. Das Bein hat das Hindernis überwunden und wechselt in seine Stemmphase.

Der überdurchschnittlich hohe Stromverbrauch im γ -Gelenk kann aus der Grafik nicht erklärt werden. Im Experimentverlauf konnte beobachtet werden, dass das Bein kurzzeitig mit dem Bodenkontakt verkantete. Das Bein ist nicht komplett senkrecht auf den Boden aufgetreten, sodass die Bewegung des γ -Gelenks kurzzeitig blockiert wurde. Effekte dieser Art haben keinen negativen Einfluss auf den Levatorreflex, da ein erhöhter Stromverbrauch

hier redundant zu dem Stromverbrauch im β -Gelenk als Bodenkontakt interpretiert werden kann.

Das hier vorgestellte Ergebnis zeigt die korrekte Funktion für den Levatorreflex. Durch den Levatorreflex können erfolgreich Hindernisse detektiert und überwunden werden. In unebenem Gelände ist dies genau wie die Detektion von Lücken eine wichtige Fähigkeit für eine Laufmaschine. Auch die Einsatzmöglichkeiten des Levatorreflexes hängen von der aktuellen Schwingphase ab. Erfährt das Bein in der Schwingphase bereits eine maximale Levation, kann der Levatorreflex in der hier vorgestellten Form nicht sinnvoll eingesetzt werden. Auch hier schränken Schritthöhe, Schrittweite und die Beweglichkeit des Beins die Möglichkeiten des Levatorreflexes ein.

5.3.9 Kombination der Reflexe

In diesem Abschnitt werden die Kombination der hier vorgestellten Reflexe und die damit verbundene Erweiterung der Schwingphase näher erläutert. Darüber hinaus werden exemplarisch das Ergebnis und die entsprechenden Messdaten für die Kombination aus Schwingphase, Levatorreflex und Suchreflex vorgestellt.

Der Bodendetektionsreflex, der Suchreflex und der Levatorreflex sind zu unterschiedlichen Zeiten während oder nach der Schwingphase aktiv. Abbildung 5.30 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt einer Schwingphase mit anschließendem Suchreflex und veranschaulicht Zeiträume, in denen die einzelnen Reflexe aktiv sind. Im oberen Teil der Grafik werden Winkelwerte der Gelenke α , β und γ in Radiant über die Zeit in Millisekunden angegeben. Im unteren Teil der Grafik markieren Pfeile die Zeiträume, in denen die einzelnen Reflexe aktiv sind.

Die Winkelkurve zeigt für die Gelenke α , β und γ die charakteristischen Kurven einer Schwingphase von Sekunde 0 bis Sekunde 1,5 und anschließend die charakteristischen Kurven für den Suchreflex von Sekunde 1,5 bis Sekunde 5,9. Ein schwarzer Pfeil unter den Winkelkurven zeigt zu dem entsprechenden Zeitraum die Aktivität der Schwingphase an. Vom Scheitelpunkt der β und γ Kurven bei 0,5 Sekunden bis zum Ende der Schwingphase befindet sich das Bein in der Absenkphase. In diesem Zeitraum ist der Bodendetektionsreflex aktiv. Dieser wird durch einen blauen Pfeil markiert. Ein roter Pfeil markiert den Suchreflex. Während des Suchreflexes durchläuft das Bein zwei weitere Absenkphasen. Zu diesen beiden Absenkphasen markieren zwei weitere blaue Pfeile die Aktivität des Bodendetektionsreflexes. Der Levatorreflex ist über den gesamten Zeitraum von Schwingphase und Suchreflex aktiv.

Die Erweiterung der Schwingphase um Suchreflex, Bodendetektionsreflex und Levatorreflex und das Zusammenspiel aller Komponenten kann mit einem Automaten beschrieben werden. In Abbildung 5.31 ist die Erweiterung des Schwing-Stemm-Automaten aus Abschnitt 5.1.2 dargestellt.

Für die Integration aller Reflexe werden die Eingaben der Einzelautomaten von je zwei auf vier Eingabemöglichkeiten erhöht. Die ursprünglichen Eingaben „Bodendetektion“ und „Bodendetektion beider benachbarter Beine“ werden durch die Eingaben „Streckung“ aus

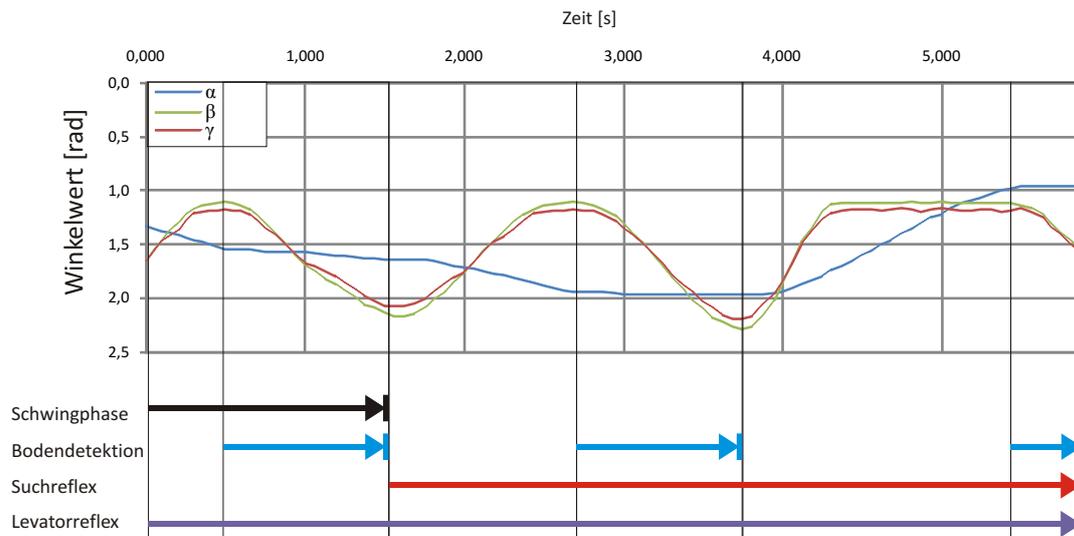


Abbildung 5.30: Aktivität von Schwingphase und den einzelnen Reflexen. Oben: Winkelwerte für α , β und γ über die Zeit. Unten: Zeiträume, in denen die Schwingphase, die Bodendetektion, die Suchphase und der Levatorreflex aktiv sind bzw. auf Eingaben reagieren können.

dem Automaten des Suchreflexes und „Hindernisdetektion“ aus dem Automaten des Levatorreflexes erweitert.

Der Automat besteht aus einem Startzustand, einem Endzustand, einem Zustand für die Stemmphase, einem Zustand für die Schwingphase und fünf weiteren Zuständen für die einzelnen Phasen des Levator- und des Suchreflexes. Aus dem Automaten des Levatorreflexes werden die Zustände „Levation“ und „Extension“ und aus dem Automaten des Suchreflexes werden die Zustände „Suche vorne“ und „Suche hinten“ übernommen. Der Zustand „Stoppe Lauf“ wird aus beiden Automaten übernommen und hier als gemeinsamer Zustand eingefügt.

Bei einer Bodendetektion wird aus jedem Zustand in den Zustand „Stemmen“ gewechselt. Aus dem Zustand „Stoppe Lauf“ wird in jedem Fall in den Zustand „Stemmen“ gewechselt. Aus den Zuständen „Schwingen“, „Levation“ und „Extension“ wird bei der Detektion einer Beinstreckung in den Zustand „Suche vorne“ gewechselt. Bei einer Hindernisdetektion wird aus den Zuständen „Schwingen“, „Suche vorne“ und „Suche hinten“ in den Zustand „Levation“ gewechselt.

Aus dem Zustand „Levation“ wird bei einer Hindernisdetektion in den Zustand „Extension“ gewechselt. Genauso wird aus dem Zustand „Suche vorne“ bei einer Beinstreckung in den Zustand „Suche hinten“ gewechselt.

Aus dem Zustand „Extension“ wird nach Ende des Bewegungsablaufs ohne Bodenkontakt oder nach einer Hindernisdetektion in den Zustand „Stoppe Lauf“ gewechselt. Aus

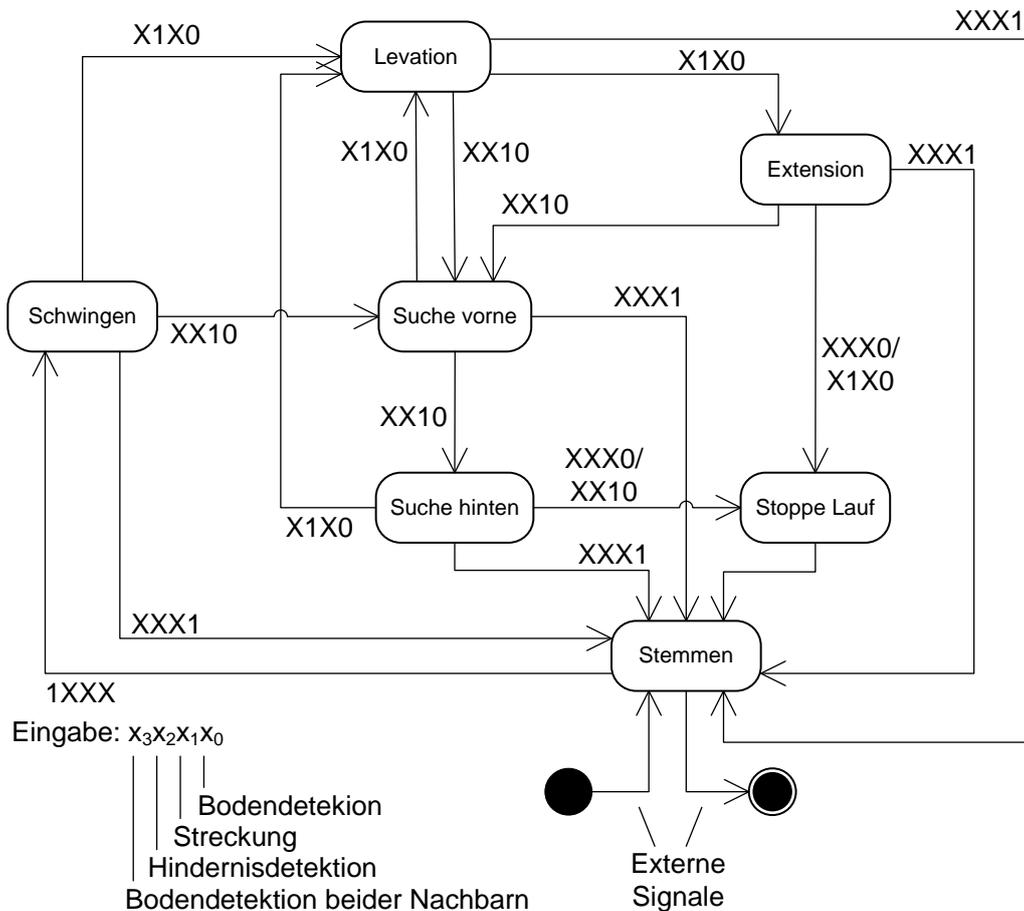


Abbildung 5.31: Erweiterter Automat für die Beinsteuerung mit Schwingphase, Suchreflex, Levatorreflex und Stemmphase. Eingaben aus allen Einzelautomaten werden genutzt. Start und Stopp des Automaten durch externe Signale.

dem Zustand „Suche hinten“ wird nach Ende des Bewegungsablaufs ohne Bodenkontakt oder nach detektierter Bein Streckung in den Zustand „Stoppe Lauf“ gewechselt.

Nach der Detektion des Bodenkontakts beider Nachbarbeine wechselt die Stemmphase in die Schwingphase. Die Bedingungen für den Start oder das Ende des Gesamtautomaten werden durch externe Eingaben ausgelöst.

Der hier beschriebene Automat für die erweiterte Schwingphase und die Stemmphase steuert ein Roboterbein. Jedes der sechs Beine wird durch den gleichen Automaten gesteuert und reagiert lokal auf die reflexauslösenden Reize.

Reflexkombination

Abschließend werden die Messdaten einer Reflexkombination vorgestellt und untersucht.

Die Reflexkombination besteht aus dem Beginn der Schwingphase, einem Levatorreflex und der anschließenden Ausführung des Suchreflexes.

Abbildung 5.32 zeigt die Messdaten für die Gelenke α , β und γ . Im oberen Teil der Grafik sind die Winkelwerte über die Zeit abgetragen. Der untere Teil der Grafik zeigt den Stromverbrauch in Prozent über die Zeit. Zusätzlich sind die berechneten Schwellwerte für die Bodendetektion in den Absenkphasen eingezeichnet. Vor weißem Hintergrund ist der Beginn der Schwingphase zu erkennen. Die Messdaten für den Levatorreflex sind in Grau und die Messdaten für die Suchphase in Beige hinterlegt. Der signifikante Ausschlag

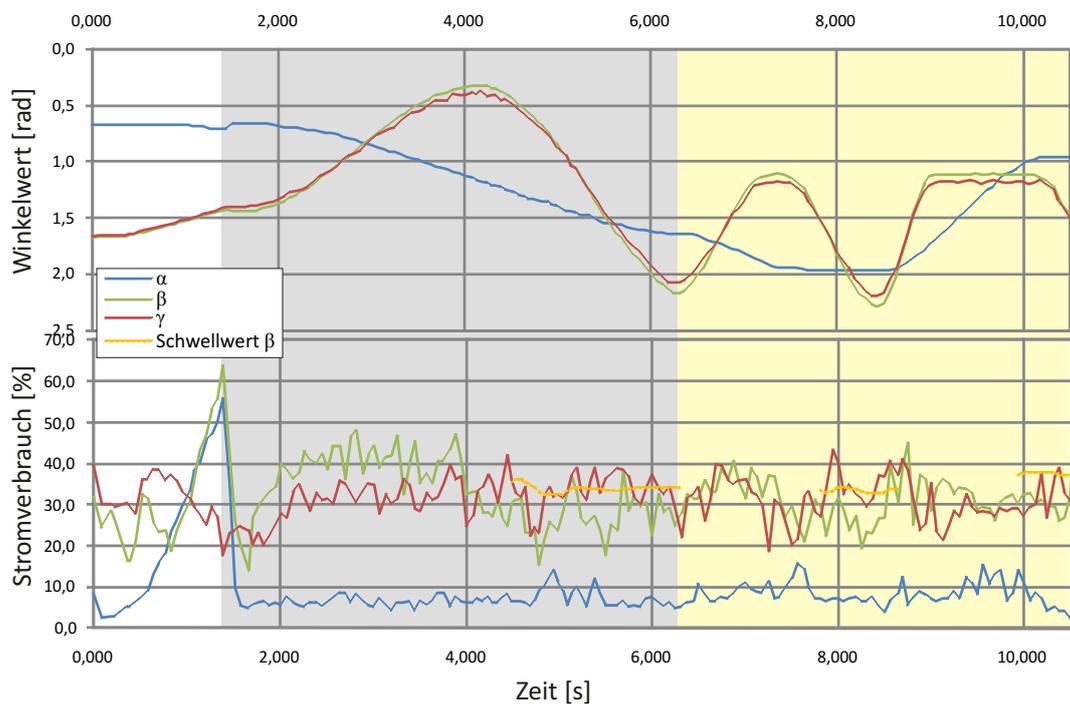


Abbildung 5.32: Reflexkombination: Oben: Winkelwerte für α , β und γ und Stromverbrauch über die Zeit. Weiß: Schwingphase. Grau: Levatorreflex. Beige: Suchreflex.

des Stromverbrauchs im α -Gelenk in Sekunde 1,7 beendet die Schwingphase und löst den Levatorreflex aus. Aus den Messdaten des Levatorreflexes ist die charakteristische Kurvenform für die Levation des Beins erkennbar. Der Scheitelpunkt der parabelähnlichen Kurve im β - und γ -Gelenk entspricht der maximalen Levation bei einem Wert von etwa $0,4 \text{ rad}$. Während der Absenkphase des Beins im Levatorreflex wird der Schwellwert für den Stromverbrauch im β -Gelenk nicht überschritten. Es wird kein Bodenkontakt detektiert. Nach einer maximalen Streckung in Sekunde 6,2 wird der Levatorreflex beendet und der Suchreflex ausgelöst. Im Verlauf der Messdaten des Suchreflexes sind die Phasen „Suche vorne“ und „Suche hinten“ zu erkennen. Das Überschreiten des Schwellwerts im Stromverbrauch des β -Gelenks beendet den Suchreflex.

Die Messwerte zeigen, dass auch die Kombination verschiedener Reflexe erfolgreich von einem Bein ausgeführt werden kann. Ein Nachteil, der durch die Kombination von Reflexen entsteht, ist der Zeitraum der Ausführung. Folgt auf die Schwingphase eine Kombination aus Reflexen, können die benachbarten Beine nicht in die Schwingphase wechseln. Dies kann zu kritischen Situationen führen und den stabilen Stand der Maschine gefährden.

Um dem vorzubeugen, wird die Koordinationsregel aus Abschnitt 5.1.2 um eine Bedingung erweitert: Sobald ein beliebiges Bein der Laufmaschine einen Reflex ausführt, ist für jedes andere Bein der Wechsel in die Schwingphase nicht erlaubt. Mit dem Erreichen der PEP stoppt die Bewegung des Beins. Ein Wechsel in die Schwingphase ist erst mit dem Beenden des Reflexes möglich. Das Stoppen der Beinbewegung führt dazu, dass die Laufmaschine stehen bleibt. Diese Reaktion hat den Vorteil, dass sich die Maschine nicht weiter auf das detektierte Hindernis zubewegt.

Das Stoppen der Beinbewegung führt darüber hinaus dazu, dass das Stützpolygon in dieser Situation nicht weiter verändert wird. Somit wird auf eine Situation, in der ein Reflex ausgelöst wird, langfristig mit dem Bewegungsstopp der Maschine reagiert.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die dezentrale Laufsteuerung eingeführt. Sie basiert auf einem einfachen Stemm-Schwing-Rhythmus in jedem Bein und auf lokalen Kommunikationsregeln zwischen benachbarten Beinen. Es konnte experimentell gezeigt werden, dass durch die Modifikation der Stemmgeschwindigkeit, respektive der Änderung des Verhältnisses zwischen Stemm- und Schwinggeschwindigkeit, verschiedene Laufmuster und Übergänge zwischen Laufmustern generiert werden können.

Die Laufsteuerung zur Schrittmustergenerierung wurde um das Kurvenlaufen erweitert. Das Kurvenlaufen basiert auf der Modifikation von PEP und AEP von drei Beinen einer Körperseite.

Aktive Nachgiebigkeit wurde für die Gelenke eingeführt und auf der Laufmaschine getestet. Die aktive Nachgiebigkeit wurde als Reflex implementiert. Als Reiz wurde die Detektion einer wirkenden Kraft, basierend auf der Messung des Stromverbrauchs, in dem entsprechenden Gelenk definiert. Die Reaktion entspricht einer aktiven Nachregelung des Gelenkwinkels.

Die Gelenknachgiebigkeit wurde um einen Schrittreflex erweitert und das Verhalten dieser Kombination für die einzelnen Gelenke experimentell untersucht und ausgewertet. Das Zusammenspiel aller Gelenke wurde in eigenen Experimenten untersucht und analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass ein Laufverhalten als emergente Reaktion auf eine externe Kraft entstehen kann. Das Zusammenspiel von Nachgiebigkeit und Schrittreflex ist vergleichbar mit einem Stemm-Schwing-Rhythmus. In Kombination mit der zuvor eingeführten Koordinationsregel konnte ein emergentes Laufverhalten generiert werden.

Für das adaptive Laufen in unebenem Gelände wurde, unabhängig von den untersuchten Reflexen zur Gelenknachgiebigkeit, die Laufsteuerung um drei Reflexe erweitert: den Bodendetektionsreflex, den Suchreflex und den Levatorreflex. Die Reizwahrnehmung ba-

siert bei dem Bodendetektionsreflex und dem Levatorreflex auf der Messung des Stromverbrauchs in den entsprechenden Gelenken. Die Messung des Stromverbrauchs ist vergleichbar mit der Messung einer Kraft, die auf das entsprechende Gelenk wirkt. Die Reizwahrnehmung für den Suchreflex basiert auf dem Vergleich der Winkelwerte im β - und γ -Gelenk mit einem vordefinierten Winkelwert. Dabei entspricht der vordefinierte Winkelwert der maximalen Beinstreckung. Als Reaktion auf den entsprechend wahrgenommenen Reiz folgt auf die Bodendetektion der Wechsel in die Stemmphase. Der Suchreflex und der Levatorreflex lösen jeweils einen stereotypen Bewegungsablauf aus.

Die Kombination von Reflexen wurde experimentell untersucht und ausgewertet. Eine Erweiterung der bereits eingeführten Koordinationsregel unterdrückt den Wechsel eines Beins in die Schwingphase, solange ein anderes Bein einen Reflex ausführt.

Die Aufgabe der hier eingeführten Reflexe besteht in der Kompensation kurzfristig auftretender Störungen des Bewegungsablaufs der Beine. Dabei können die wahrgenommenen Reize als Detektion von Unregelmäßigkeiten oder als Abweichungen von einem ungestörten Laufen interpretiert werden. Wird zum Beispiel ein Hindernis durch das Auslösen eines Reflexes überwunden, hat der Reflex eine aufgetretene Anomalie im Bewegungsablauf der Maschine kompensiert. Die Anomalie entspricht dabei einer kurzfristig auftretenden Störung beziehungsweise Unregelmäßigkeit.

Kann ein Reflex die aufgetretene Anomalie nicht kompensieren, folgt der Stopp des Laufverhaltens. In diesem Fall muss auf höherer Ebene das aktuelle Verhalten der Laufmaschine angepasst oder gewechselt werden. Als einfaches Beispiel könnte die Laufmaschine einen Schritt zurück machen, sich auf der Stelle drehen und versuchen, in eine andere Richtung weiterzugehen. Auch das Aktivieren eines spezialisierten Verhaltens oder eines Standardverhaltens für schwierige Situationen ist denkbar.

Es konnte gezeigt werden, dass die eingeführte dezentrale Laufsteuerung mit den integrierten Reflexen auf schwache Anomalien reagiert und diese kompensieren kann. Es stellt sich die Frage, ob das eingeführte System auch auf gravierende Anomalien reagieren kann. Die in diesem Kapitel beschriebenen Konzepte und Steuerungen sind ausschließlich mit BCUs umgesetzt worden. Um die korrekte Funktionalität von BCUs beziehungsweise die Robustheit der Steuerung zu überprüfen und eventuell weitere Anomalien detektieren zu können, werden im folgenden Kapitel die Einsatzmöglichkeiten für OCUs untersucht.

Kapitel 6

Kontrollarchitektur - OCU Implementierungen

Inhalt

6.1	Anomalieklassifikation	103
6.2	Reaktionen auf langfristige Anomalien	106
6.2.1	Beinausfall	106
6.2.2	Ausfall von zwei Beinen	113
6.2.3	Zielfolgeverhalten mit Beinausfall	116
6.2.4	Eingriff einer OCU	123

In dieser Arbeit wird neben der Adaptivität der Laufsteuerung auch deren Robustheit und Zuverlässigkeit behandelt. In diesem Kapitel werden Störungen des Bewegungsablaufs untersucht. Neben der Anpassungsfähigkeit biologischer Organismen an ihre vielseitige Umwelt, ist auch die Anpassung an unerwartete Änderungen und die damit verbundenen Einschränkungen des eigenen Organismus erstaunlich. Von kleinen Verletzungen bis hin zu Verlusten von ganzen Körperteilen kann eine Anpassung an die Veränderungen beobachtet werden. Das Auftreten solcher Störungen wird individuell kompensiert. Es gibt kein Fehlermodell für die möglichen Verletzungen und Ausfälle. Die Zuverlässigkeit und Robustheit biologischer Systems basiert auf rein reaktivem Verhalten. Durch die ununterbrochene Interaktion zwischen Organismus und Umwelt passen sich biologische Organismen zu jedem Zeitpunkt an Änderungen der Umwelt und auch an Änderungen des eigenen Körpers an.

In den folgenden Abschnitten werden Auswirkungen von Unregelmäßigkeiten beziehungsweise Anomalien untersucht und mögliche Reaktionen vorgestellt.

6.1 Anomalieklassifikation

Eine Anomalie entspricht der Abweichung von einer Regelmäßigkeit. Das bedeutet, dass es eine zugrunde liegende Regelmäßigkeit gibt, von der eine Abweichung möglich ist. Im Folgenden werden Anomalien behandelt, die während des Laufverhaltens auftreten. Dafür wird der ungestörte Lauf auf einem ebenen Untergrund als Ausgangssituation definiert. Jede Abweichung von dieser Ausgangssituation wird als Anomalie interpretiert. Für eine

grobe Klassifikation der verschiedenen Anomalien kann eine Anomalie nach den Kriterien Zeitraum, Ort, zeitlicher Verlauf und Intensität charakterisiert werden.

Der Zeitraum gibt an, ob eine Anomalie über einen kurzen oder einen langen Zeitraum detektiert wird. Die Zeit wird dabei in Schwing- oder Stemmphasen gemessen. Eine Anomalie, die durch einen kurzzeitigen Ausschlag eines Sensorsignals auftritt, wird als kurzzeitige Anomalie interpretiert. Tritt eine Anomalie zum Beispiel über den Zeitraum einer Schwingphase auf, wird dies als langzeitige Anomalie interpretiert. In dieser Arbeit werden ausschließlich langzeitige Anomalien behandelt.

Der Ort, an dem die Anomalie auftritt, kann entweder die Umwelt oder der eigene Körper sein. In beiden Fällen wird der normale Bewegungsablauf des Läufers gestört. Umweltanomalien entsprechen Unebenheiten im Untergrund oder Hindernissen. Körpereigene Anomalien entsprechen Verletzungen beziehungsweise Defekten oder Ausfällen in der Maschine. Umweltanomalien wie Hindernisse, Stufen oder Lücken im Boden erfordern die Adaption des Bewegungsablaufs. Dies gilt auch für körpereigene Anomalien. Die Laufmaschine kann nicht identifizieren, ob eine Anomalie in ihrer Umwelt oder am eigenen Körper auftritt. Die Laufmaschine ist in ständiger Interaktion mit der Umwelt und kann die Ursachen für Störungen in ihrem Bewegungsablauf räumlich nicht zuordnen. Detektiert die Maschine zum Beispiel keinen Bodenkontakt, kann nicht entschieden werden, ob die Sensoren defekt sind oder ob für das Bein kein Untergrund erreichbar ist.

Der zeitliche Verlauf gibt an, ob die Anomalie abrupt oder graduell auftritt und detektiert wird. Dabei beeinflusst die Art der Detektion, ob eine graduelle Anomalie erkannt werden kann. Werden für die Beschreibung der Ausgangssituation feste Grenzen für Sensorwerte definiert, wird eine graduelle Anomalie erst mit dem Über- oder Unterschreiten einer Grenze detektiert und kann somit nur als abrupte Anomalie erkannt werden. Die Detektion gradueller Veränderungen setzt die Speicherung von Werten für einen Änderungsvergleich über die Zeit voraus.

Neben den hier aufgeführten Kriterien kann auch die Intensität einer Anomalie zur Klassifizierung herangezogen werden. In dieser Arbeit werden Anomalien in drei Intensitätsstufen unterteilt: schwache, starke und extreme Anomalien.

Schwache Umweltanomalien können eine Änderung der Untergrundbeschaffenheit sein, während schwache körpereigene Anomalien eine Gewichtsänderung der Maschine oder Verschleißerscheinungen zum Beispiel in den Aktuatoren sind.

Eine starke Umweltanomalie kann der Wechsel zu einem unebenen Untergrund mit kleinen Hindernissen sein, wobei die Hindernisse in Bezug auf die Schritthöhe und Schrittweite der Roboterbeine begehbar sind. Eine starke körpereigene Anomalie wird durch leichtere Defekte der Laufmaschine, wie die Änderung der Segmentlänge eines Beins oder der Störung eines Sensors, repräsentiert.

Extreme Umweltanomalien entsprechen sehr schwer überwindbaren Hindernissen, wie zum Beispiel einem Gelände mit vielen Bodenwellen und Hindernissen oder einer starken Steigung. Extreme körpereigene Anomalien können Beschädigungen des Bewegungsapparats sein, wie zum Beispiel die Beschädigung eines Gelenks oder der Ausfall eines Beins. Auch beschädigte Sensorteile oder ausgefallenen Sensoren sowie Sensorgruppen entsprechen einer extremen Anomalie.

Anomalie			
Zeitraum	kurzzeitige	langzeitige	
Ort	Umwelt	Körper	
Zeitlicher Verlauf	abrupt	graduell	
Intensität	schwach	stark	extrem

Abbildung 6.1: Übersicht über die Klassifikationskriterien für Anomalien

Schwache Anomalien:

Die hier beschriebenen schwachen Umweltanomalien und auch die körpereigenen Anomalien sollten durch elementare Reflexe, wie zum Beispiel den in Abschnitt 5.3 beschriebenen Bodendetektionsreflex, kompensiert werden. Diese Reflexe sind in die Schwing-BCU integriert und kompensieren zum Beispiel nachgebenden Untergrund unmittelbar. Auch eine Gewichtsänderung der Maschine sollte durch den hier vorgestellten Bodendetektionsreflex kompensiert werden.

Starke Anomalien

Starke Anomalien lösen die Reaktion des beschriebenen Suchreflexes oder des Levatorreflexes in den entsprechenden Beinen aus. Der Such- und der Levatorreflex können unebenes Gelände mit Hindernissen kompensieren. Die Änderung von Segmentlängen der Beine kann zum Beispiel durch den Bodendetektionsreflex kompensiert und zusätzlich durch die Unterdrückung des Suchreflexes unterstützt werden. Redundante Signale können einander ersetzen, wie zum Beispiel die Bodendetektion, die sowohl durch einen Schalter als auch durch die Messung des Stromverbrauchs aus Abschnitt 5.3.6 abgefragt werden kann. Die hier genannten Reflexe sind in die Schwing-BCU integriert. Die Unterdrückung eines Reflexes sollte durch den Eingriff einer OCU ausgelöst werden.

Extreme Anomalien

Das Auftreten extremer Anomalien fordert gegebenenfalls Eingriffe in die aktuelle Verhaltensebene und somit auch in der Reflexebene. Bei der Detektion einer extremen Anomalie muss in jedem Fall die aktuelle Laufgeschwindigkeit reduziert oder der Lauf gestoppt werden, um die Stabilität des Läufers zu erhöhen. Wenn zum Beispiel eins der Vorderbeine keinen Bodenkontakt detektiert, muss die Maschine sofort gestoppt werden, damit ein Sturz in die detektierte Lücke vermieden werden kann. Das Laufverhalten muss durch ein anderes Verhalten abgelöst werden. Ein stabilisierendes Verhalten oder ein Verhalten zur Exploration der Umgebung sollte das Laufverhalten ablösen. Dasselbe gilt für extreme körpereigene Anomalien wie die Beschädigung oder Teilausfälle des Bewegungsapparats oder des Sensorsystems. Die nötigen Verhaltensänderungen müssen durch überwachende OCUs ausgelöst werden.

Abbildung 6.1 zeigt eine Übersicht über die hier vorgestellten Kriterien für die Anomalieklassifikation.

6.2 Reaktionen auf langfristige Anomalien

Es ist nicht ungewöhnlich, Insekten mit fehlenden Beinen in ihrem natürlichen Habitat zu beobachten. Die sechsbeinigen Läufer passen sich größeren Verletzungen, wie zum Beispiel dem Verlust eines Beins, gut an. Einige Insekten sind sogar in der Lage ein Bein selbst abzutrennen. Diese Fähigkeit wird Autotomie genannt und entspricht, ähnlich wie bei Eidechsen, die ihren Schwanz abwerfen können, der Möglichkeit einem Angreifer oder Jäger zu entkommen. Anders als bei dem Schwanz der Eidechsen wächst das Bein der Insekten nicht nach.

Das Abtrennen eines Beins ist ein starker Eingriff in die Funktionalität des Lokomotionsapparats. Die Insekten müssen ihr Laufverhalten allerdings direkt fortsetzen können, da die Autotomie in der Regel immer in einer gefährlichen Situation ausgeführt wird.

Biologische Untersuchungen von Graham an der Stabheuschrecke *Carausius morosus* haben gezeigt, dass die Insekten in der Lage sind, nach einer Beinamputation ein angepasstes und stabiles Schrittmuster zu übernehmen [46]. Abhängig davon welches Bein und wie viele Beine amputiert wurden, folgte eine Adaption sofort. Schilling konnte durch die Erweiterung des Walknets, siehe Abschnitt 3.1, in einer Computersimulation erfolgreich die Anpassung eines Insektenmodells an eine Beinamputation zeigen [105]. Schilling ergänzte einen neuen Koordinationseinfluss. Die Ergebnisse aus der Computersimulation, gesteuert durch das modifizierte Walknet, haben große Ähnlichkeit zu den experimentellen Ergebnissen Grahams.

6.2.1 Beinausfall

Im Folgenden werden die Auswirkungen von Beinausfällen, respektive Beinamputationen, an der sechsbeinigen Roboterplattform OSCAR untersucht und analysiert. Ein Beinausfall entspricht einer langfristigen, abrupten und extremen Anomalie im Körper des Läufers. Es werden plötzliche Beinausfälle während des Laufens untersucht. Dafür wird eine Beinamputation simuliert, indem das entsprechende Bein in eine starre Stellung unter den Körper geklappt wird. Abbildung 6.2 stellt die simulierte Beinamputation in einem dreidimensionalen Modell dar.

Für die Anpassung an Beinausfälle und Beinamputationen wird die Koordinationsregel der Laufsteuerung aus Abschnitt 5.1.2 erweitert. Die Auswirkungen verschiedener Beinausfälle in unterschiedlichen Situationen werden experimentell untersucht und ausgewertet.

6.2.1.1 Anpassung der Beinkoordination

Der Ausfall eines Beins entspricht nach der in Abschnitt 6.1 eingeführten Klassifikation einer spontanen, extremen Anomalie. Im Falle eines Beinausfalls oder einer Beinamputation

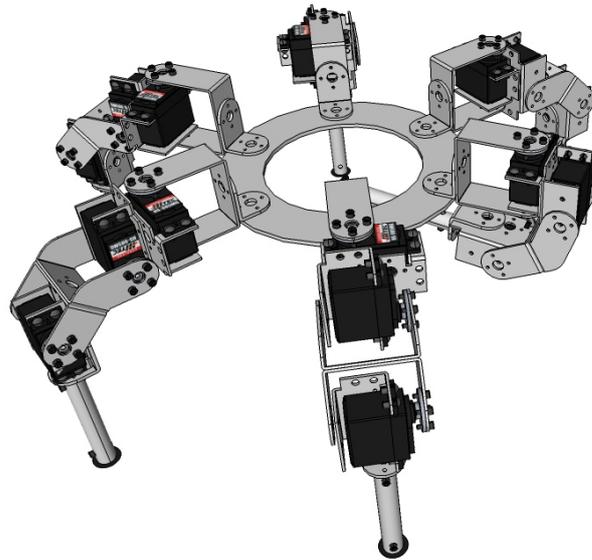


Abbildung 6.2: Laufmaschine mit simulierter Amputation.

führt die Einhaltung der Koordinationsregel aus Abschnitt 5.1.2 dazu, dass die Nachbarbeine des ausgefallenen Beins bis an ihre physische Grenze bewegt werden und dort verharren. Die Koordinationsregel erlaubt einem Bein den Wechsel in die Schwingphase erst dann, wenn beide benachbarten Beine die Detektion des Bodenkontakts signalisieren. Ist das Nachbarbein ausgefallen, wird dieses Signal nicht mehr erzeugt und die Nachbarn des ausgefallenen Beins dürfen nicht mehr in die Schwingphase wechseln. Die verbleibenden drei Beine sind nicht betroffen und führen weiter ihren Schwing-Stemmrhythmus aus.

Abhängig von der Position des ausgefallenen Beins ergeben sich verschiedene unangepasste Laufmuster mit zwei unbeweglichen Beinen. Fällt ein Vorderbein aus, wird der Roboter durch das gegenüberliegende Bein und seine Nachbarn nach vorne geschoben, während die Nachbarbeine des ausgefallenen Beins sich nicht vom Boden lösen. Analoges gilt für den Ausfall eines Hinterbeins; das gegenüberliegende Vorderbein und seine Nachbarn ziehen den Roboter nach vorne. Bei dem Ausfall eines Mittelbeins liegen die drei unbeeinflussten Beine auf der einer Körperseite. Das ausgefallene Bein und seine Nachbarn liegen auf der gegenüberliegenden Körperseite. In dieser Situation entsteht eine Drehbewegung der Maschine beziehungsweise ein enger Kurvenlauf.

Zur Vermeidung der beschriebenen Auswirkungen und zur Integration der beeinflussten intakten Nachbarbeine muss die Koordinationsregel im Fall eines Beinausfalls angepasst werden. Dazu muss ein ausgefallenes Bein detektiert und die entsprechende Beinsteuerung abgeschaltet oder modifiziert werden.

Als einfacher Ansatz kann das ausgefallene Bein ignoriert und in die Koordinationseinflüsse nicht weiter mit einbezogen werden. Dadurch wird jeweils das nächste intakte Bein als Nachbarbein interpretiert. Die dezentrale Laufsteuerung mit der lokalen Koordination kontrolliert dann eine fünfbeinige Laufmaschine.

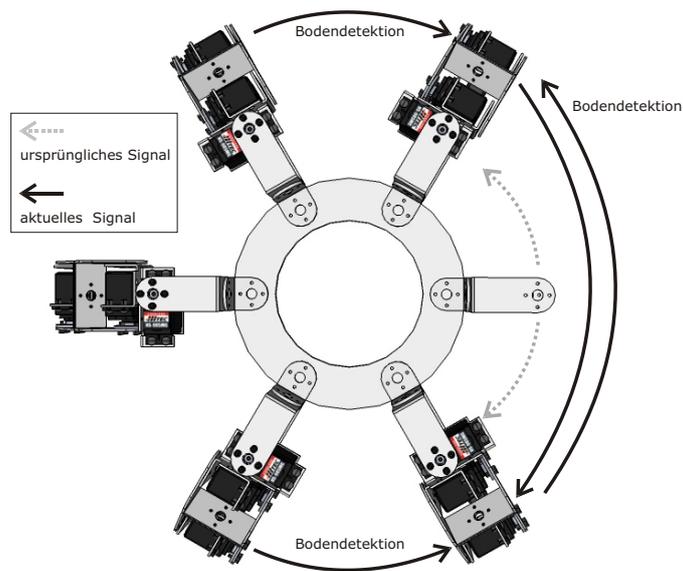


Abbildung 6.3: Roboterplattform mit amputiertem Bein

Abbildung 6.3 zeigt die schematische Darstellung der Nachbarschaftsaktualisierung im Falle eines Beinausfalls.

Die Detektion eines Beinausfalls und die Anpassung der Nachbarschaftsbeziehung unter den Beinen stellen eine Abweichung vom Regelfall dar. Das Erkennen dieser Anomalie und die entsprechende Anpassung fallen in den Einsatzbereich der OCU für das entsprechende Bein. Im folgenden Abschnitt wird das Zusammenspiel von OCU und BCU als Reaktion auf einen Beinausfall erläutert und auf die Implementierung eingegangen.

6.2.1.2 Implementierung der OCU-BCU-Interaktion

Jedes Bein besitzt eigene OCUs, die die Signale der BCUs überwachen und auf Anomalien überprüfen. Dabei können Teilbereiche oder das Gesamtverhalten des Beins überwacht werden. Für die Detektion eines Beinausfalls wird eine OCU eingesetzt, die das Gesamtverhalten eines Beins überwacht. Ein Beinausfall wird erkannt, wenn entweder keine Signale beziehungsweise durchgehend konstante Signale beobachtet werden oder die überwachten Signale auf kein bekanntes Muster oder Verhalten passen. Im letzteren Fall wird von einer starken Beschädigung des Beins ausgegangen, und das Bein muss vom System selbst deaktiviert werden.

Die Deaktivierung eines Beins wird von der entsprechenden OCU ausgeführt und in der Bein-BCU gespeichert. Der Status, ob ein Bein aktiviert oder deaktiviert ist, kann von den Nachbarbeinen abgefragt werden. Mit der Detektion eines benachbarten Beinausfalls oder der Deaktivierung eines Nachbarbeins müssen die Nachbarschaftsbeziehungen unmittelbar aktualisiert werden [36]. Dazu kann ein Bein bei der Anforderung der Bodenkontaktsignale seiner Nachbarbeine auch deren Aktivitätsstatus abfragen. Ist eines der Nachbarbeine

deaktiviert, werden die Bodenkontaktsignale von dem nächsten intakten Bein abgefragt. Dazu wird die Koordinationsregel 5.1 aus Abschnitt 5.1.2, die in jedem Bein ausgeführt wird, um folgende Bedingung erweitert:

Listing 6.1: Koordinationsregel

```
nachbar_links = bein[i-1];
nachbar_rechts = bein[i+1];

wenn: nachbar_links.istDeaktiviert()
dann: nachbar_links = bein[i-2];

wenn: nachbar_rechts.istDeaktiviert()
dann: nachbar_rechts = bein[i+2];

wenn: nachbar_links.hatBodenkontakt() &&
      nachbar_rechts.hatBodenkontakt()
dann: bein[i].schwingen();

sonst: bein[i].stemmen();
```

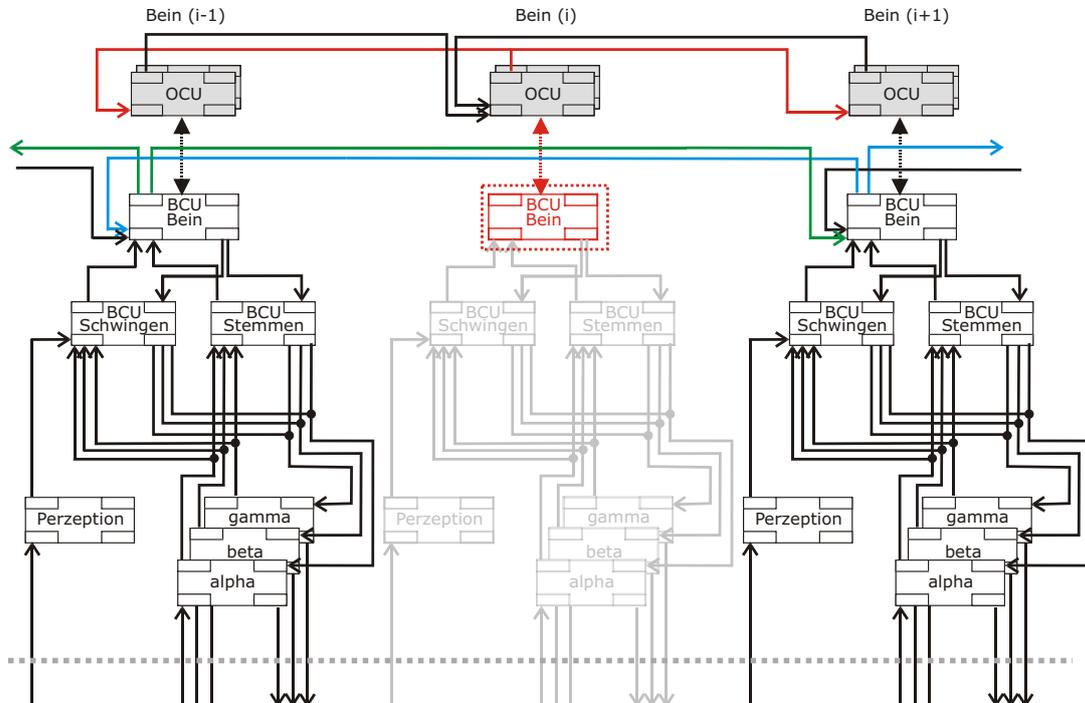


Abbildung 6.4: ORCA-Struktur mit Anpassung an einen Beinausfall

In Abbildung 6.4 ist ein Ausschnitt aus der Kontrollarchitektur für drei benachbarte Beine dargestellt. Jedes Bein wird durch eine Bein-BCU repräsentiert, die von einer OCU überwacht wird. Weitere OCUs können Teilbereiche wie zum Beispiel die Schwingphase oder die in der Schwingphase integrierten Reflexe überwachen. Die Bein-BCU steht mit einer Schwing- und einer Stemm-BCU in Kontakt und koordiniert den Wechsel zwischen diesen beiden Phasen. Für die Koordination tauscht die Bein-BCU mit den benachbarten Bein-BCUs die erforderlichen Signale über die Bodendetektion aus. Die Schwing- und Stemm-BCUs fragen den Stromverbrauch und die reale Winkelstellung in den BCUs für die Gelenke α , β und γ ab und aktualisieren die Winkelwerte. Die Schwing-BCU bekommt zusätzlich das Signal des Tasters für die Bodendetektion über die Perzeptions-BCU. Die BCUs für α , β und γ senden die Befehle an die Servomotoren und fragen die benötigten Werte ab. Die Perzeptions-BCU nimmt das Signal des Tasters im Fuß auf und gibt es weiter. Die Grenze zwischen Software- und Hardwareeinheiten wird durch die gestrichelte, hellgraue Linie unter den BCUs symbolisiert.

Ein Beinausfall wurde für Bein i detektiert. Die OCU von Bein i deaktiviert die Bein-BCU und informiert die OCUs der Nachbarbeine. Der Informationsaustausch unter den OCUs dient der Gesamtübersicht über das System und wird von höherer Ebene überwacht. Durch die Deaktivierung der Bein-BCU für Bein i werden zur nächsten Abarbeitung der erweiterten Koordinationsregel aus Listing 6.1 die Nachbarschaftsbeziehungen aktualisiert. Nach der Aktualisierung wird Bein i für den Informationsaustausch unter den BCUs nicht mehr berücksichtigt. In Abbildung 6.4 wird die Deaktivierung von Bein i durch eine rote BCU und eine gepunktete Abtrennung markiert. Der Informationsaustausch unter den OCUs ist mit roten Pfeilen markiert. Der Informationsaustausch unter den BCUs ist durch grüne Pfeile für Signale von Bein $i - 1$ und durch blaue Pfeile für Signale von Bein $i + 1$ repräsentiert. Die Schwing- und die Stemm-BCU von Bein i sowie die BCUs der drei Gelenke α , β und γ und die Perzeption-BCU sind symbolisch verblasst dargestellt. Mit der Deaktivierung eines Beins werden auch die in Hellgrau gezeigten Einheiten deaktiviert.

6.2.1.3 Experimentelle Ergebnisse

Um die Robustheit der dezentralen Laufsteuerung in Bezug auf den Ausfall eines Beins zu untersuchen, wird ein Beinausfall wie in Abbildung 6.4 simuliert. Dazu läuft die Laufmaschine auf einem ebenen Untergrund. Während des Laufs wird zu einem zufälligen Zeitpunkt ein Bein deaktiviert. Während des Experiments werden die Signale der Fußtaster der einzelnen Beine aufgezeichnet. In Abbildung 6.5 sind die Daten in Form eines Schrittmusterdiagramms dargestellt. Es sind die Bodenkontakte für alle sechs Beine in eigenen Zeilen über die Zeit angegeben. Der Beinausfall ist mit einer gestrichelten Senkrechten markiert. Die Zeitangaben sind mit Sekunde 0 am Zeitpunkt der Beindeaktivierung ausgerichtet. Negative Zeitangaben geben die Zeit vor dem Beinausfall an.

Mit der Deaktivierung des rechten Mittelbeins zum Zeitpunkt 0 werden die Zeitspannen, in denen die Nachbarbeine Bodenkontakt detektieren, länger. In den unbeeinflussten Beinen vorne links, in der Mitte links und hinten links treten in unregelmäßigen Abständen kurze Bodenkontakte auf. Eine weitere Auffälligkeit ist im linken Vorder- und Mittelbein

zu erkennen. Zu den Sekunden 10,5; 23 und 33 signalisieren die beiden benachbarten Beine, dass sie keinen Bodenkontakt detektieren.

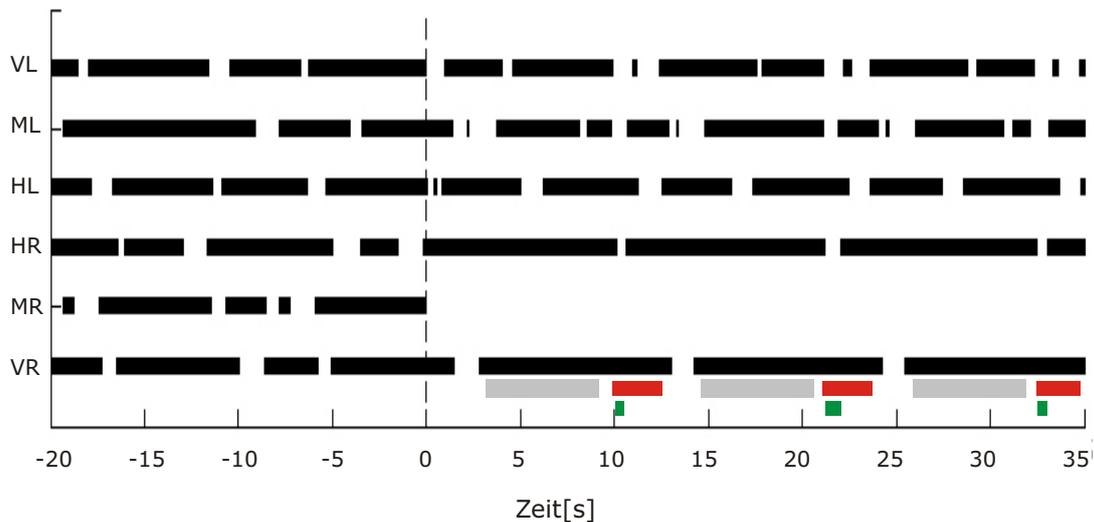


Abbildung 6.5: Schrittmusterdiagramm: Beinausfall zum Zeitpunkt 0. Die Stemmphasen sind in schwarz eingezeichnet. In Rot und Grün sind die Stemmphasen der intakten Nachbarbeine von dem Bein vorne Rechts (VR) eingezeichnet. Grau entspricht der zu erwartenden Stemmphase von Bein (VR).

6.2.1.4 Auswertung

Das vorgestellte Ergebnis zeigt, dass trotz des Beinausfalls ein angepasstes Schrittmuster ausgeführt wird. Es können allerdings drei Auffälligkeiten beobachtet werden: die Verlängerung der Stemmphase für die Nachbarbeine des ausgefallenen Beins, kurzzeitige Detektionen des Bodens in einzelnen Beinen sowie benachbarte Beine, die keinen Bodenkontakt detektieren.

Durch den simulierten Beinausfall wird das betroffene Bein unter den Roboter geklappt. Dadurch entsteht eine Lücke zwischen den beiden Nachbarbeinen und das Maximum der Fläche des Stützpolygons verringert sich. Zusätzlich lastet das Gewicht des ausgefallenen Beins zwischen den beiden Nachbarbeinen. Durch die ungleiche Lastverteilung und die ungleiche Verteilung der unterstützenden Beine gelangt die Maschine in eine nach rechts geneigte Schiefelage.

Bedingt durch die Schiefelage sind die Nachbarbeine des ausgefallenen Beins zusätzlich belastet. Das rechte Hinterbein schiebt den Roboterkörper hauptsächlich nach vorne. Durch die Schiefelage und die zusätzliche Belastung trägt das rechte Hinterbein einen Großteil des Körpergewichts und löst sich in seiner Schwingphase nur noch selten vom Untergrund.

Die langen Bodenkontaktphasen des rechten Vorderbeins können zum einen durch eine höhere Belastung und zum anderen durch den Einfluss der Nachbarbeine erklärt werden. In

Abbildung 6.5, unter der Zeile für das rechte Vorderbein, ist die durchschnittliche Stemmphasenlänge in Grau, die Schwingphase des linken Vorderbeins in Rot und die Schwingphase des rechten Hinterbeins in Grün angegeben. Nach dem Beinausfall sind das linke Vorderbein und das rechte Hinterbein die Nachbarbeine des rechten Vorderbeins. Nach der Koordinationsregel hängt von diesen beiden Beinen ab, ob das rechte Vorderbein von der Stemm- in die Schwingphase wechseln darf oder nicht. Die Stemmphase mit durchschnittlicher Länge (in Grau) endet regelmäßig in etwa mit dem Beginn der Schwingphase des linken Vorderbeins. Durch die Koordinationsregel kann das rechte Vorderbein für diesen Zeitraum nicht in die Schwingphase wechseln. Regelmäßig mit dem Ende der Schwingphase des benachbarten Beins beginnt das rechte Vorderbein mit seiner Schwingphase. Demnach wird die verlängerte Stemmphase des rechten Vorderbeins teilweise durch den Stemm-Schwing-Rhythmus des linken Vorderbeins verursacht.

Nach dem Beinausfall kann bei der Laufmaschine während des Laufens rhythmisches Kippen beobachtet werden. Die Ursache für dieses Kippen liegt in der Beziehung zwischen dem projizierten Masseschwerpunkt und dem Stützpolygon der Maschine zueinander. Wenn das rechte Hinterbein in die Schwingphase wechselt, stellt die Verbindung der Fußpunkte des rechten Vorderbeins und des linken Hinterbeins eine Grenze des Stützpolygons dar. Da diese Beine einander gegenüber liegen, kann die Grenze durch den projizierten Masseschwerpunkt M' verlaufen. Ein stabiler Stand ist dann nicht mehr gesichert. Abhängig von der aktuellen Position der beiden Beine liegt der projizierte Masseschwerpunkt der Maschine innerhalb oder außerhalb des Stützpolygons. Liegt der projizierte Masseschwerpunkt außerhalb, kippt die Maschine. Das Kippen kann analog durch den Wechsel des rechten Vorderbeins von der Stemm- in die Schwingphase ausgelöst werden. In dieser Situation kann die Maschine um die Achse zwischen rechtem Hinterbein und linkem Vorderbein kippen.

Mit dem Anheben des rechten Hinterbeins kippt der Roboter auf das rechte Hinterbein zu. Der Roboter kippt auf das gebeugte Hinterbein und drückt es auf den Boden. Dadurch wird die Dauer, in der das Hinterbein keinen Bodenkontakt hat, verkürzt. Das bedeutet, dass das rechte Hinterbein durch die Beugung den Roboterkörper abkippen lässt und ihn durch die Streckung wieder anhebt. Durch dieses Kippen verlieren die gegenüberliegenden Beine den Bodenkontakt. In dem Schrittdiagramm ist zu erkennen, dass der gleichzeitige Verlust des Bodenkontakts in dem linken Vorder- und Mittelbein im Rhythmus der Schwingphase des rechten Hinterbeins auftritt.

Das Anheben des rechten Vorderbeins kann auf ähnliche Weise das linke Mittel- und Hinterbein beeinflussen. Dabei hängt die Kippwahrscheinlichkeit von der aktuellen Fußstellung der stemmenden Beine ab.

Die kurzen Bodenkontakte werden durch das Zurückkippen verursacht. Hat ein Bein während seiner Stemmphase durch die Kippbewegung den Bodenkontakt verloren und kippt zum Ende seiner Stemmphase zurück, wird kurz der Bodenkontakt detektiert und direkt in die Schwingphase gewechselt.

Trotz der Unregelmäßigkeiten und der rhythmischen Kippbewegung entsteht durch die dezentrale Steuerung ein Laufverhalten. Die Beine werden, beeinträchtigt durch die Kippbewegung, untereinander koordiniert und der Roboter kann trotz eines Beinausfalls sein

Laufverhalten fortsetzen. Die starke Anomalie kann, mit Einschränkungen in der Stabilität, durch das hier vorgestellte Steuerungskonzept kompensiert werden. Nach diesen Ergebnissen stellt sich die Frage, in wie weit die Maschine weitere Ausfälle kompensieren kann.

6.2.2 Ausfall von zwei Beinen

Im letzten Abschnitt konnte gezeigt werden, dass die Laufsteuerung den Ausfall eines Beins mit der Aktualisierung der Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Beinen mit Einschränkungen in der Mobilität kompensieren konnte. In diesem Abschnitt wird untersucht, ob der Ausfall eines zweiten Beins ebenfalls kompensiert werden kann. Für den Fall, dass zwei Beine ausfallen, gibt es drei verschiedene Kombinationsmöglichkeiten: ein intaktes Bein besitzt zwei ausgefallene Nachbarbeine, zwei gegenüberliegende Beine fallen aus oder zwei benachbarte Beine fallen aus. In Abbildung 6.6 werden diese drei Varianten von links nach rechts in einer Draufsicht gezeigt. Zusätzlich sind unter der jeweiligen Variante die Stützpolygone und der Masseschwerpunkt angegeben. Dabei ist das maximale Stützpolygon in Grau und ein kritisches Stützpolygon in Rosa angegeben. Das kritische Stützpolygon entsteht, wenn ein Bein in die Schwingphase wechselt, wobei hier die kritischsten Fälle angegeben sind. Zusätzlich ist der projizierte Masseschwerpunkt als roter Kreis eingezeichnet.

In der ersten Variante, in der das intakte Bein zwei ausgefallene Nachbarbeine besitzt, kann dieses intakte Bein nicht in die Schwingphase wechseln, ohne die statische Stabilität der Maschine aufzuheben. Das kritische Stützpolygon in Abbildung 6.6 a) kann den projizierten Masseschwerpunkt nicht umschließen.

In der zweiten Variante, in der zwei gegenüberliegende Beine ausgefallen sind, kann die statische Stabilität erhalten werden, sofern nur ein Bein in die Schwingphase wechselt. Dabei müssen die Fußpunkte der drei verbleibenden stehenden Beine ein Stützpolygon aufspannen, das den projizierten Masseschwerpunkt umschließt. In Abbildung 6.6 b) liegt der projizierte Masseschwerpunkt auf der Grenze des kritischen Stützpolygons. Hier könnte, bei passender Beinstellung, die statische Stabilität gewährleistet werden.

Wenn in der dritten Variante eines der beiden Beine, das ein ausgefallenes Bein zum Nachbarn hat, in die Schwingphase wechselt, kann, wie in der ersten Variante, kein Stützpolygon aufrecht erhalten werden, das den projizierten Masseschwerpunkt umschließt (siehe Abbildung 6.6 c).

Die vorgestellten Varianten für zwei Beinausfälle zeigen, dass nur für Variante b) die realistische Chance besteht, dass die Laufsteuerung ohne weitere Modifikation den Ausfall von zwei Beinen kompensieren kann. Im Folgenden wird die experimentelle Untersuchung vorgestellt, in der der Ausfall von zwei Mittelbeinen simuliert wird.

6.2.2.1 Experimentelle Ergebnisse

Um die adaptiven Eigenschaften der Laufsteuerung in Bezug auf den Ausfall zweier gegenüberliegender Beine experimentell zu untersuchen, läuft der Roboter auf einem ebenen

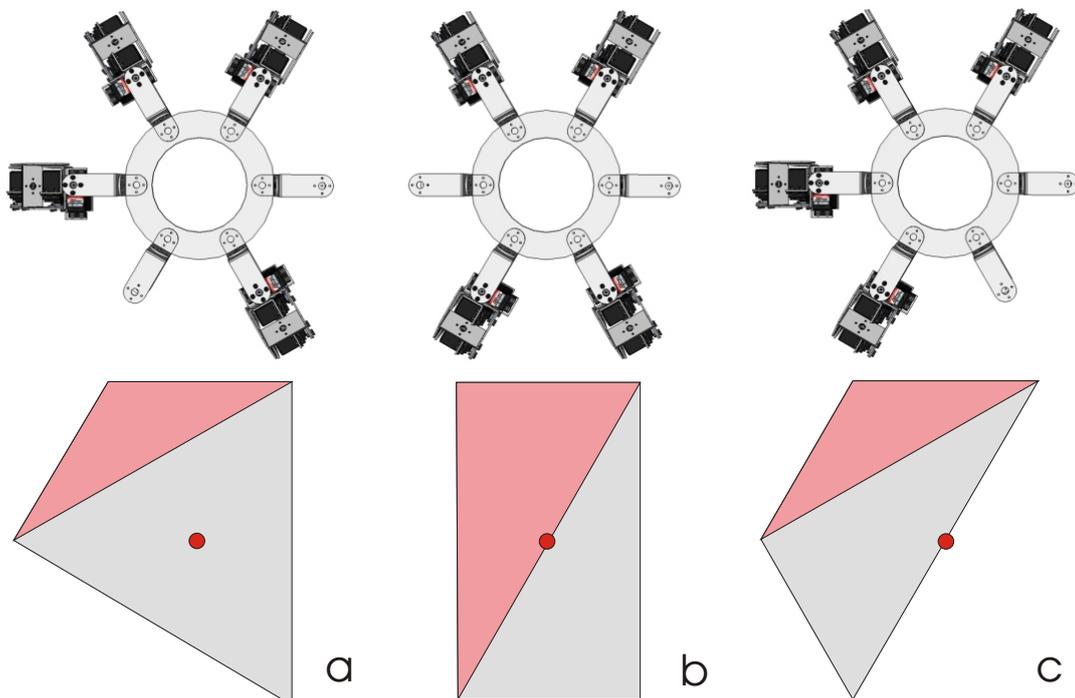


Abbildung 6.6: Oben: Variationsmöglichkeiten für die Amputation von zwei Beinen. Unten: die maximalen Stützpolygone in Grau, die kritischen Stützpolygone in Rosa und der projizierte Masseschwerpunkt in Rot

Untergrund. Nach einer zufälligen Zeitdifferenz wird ein Bein deaktiviert. Nach einer weiteren zufälligen Zeitdifferenz wird ein weiteres Bein deaktiviert. Es wird der Ausfall für die beiden Mittelbeine simuliert. Während des Experiments werden die Fußkontaktsignale aller Beine aufgezeichnet.

In Abbildung 6.7 sind die Fußkontakte der sechs Beine in einem Schrittmusterdiagramm dargestellt. Bodenkontakte sind für jedes Bein in einer eigenen Zeile über die Zeit dargestellt. Bei Sekunde 0 wird der Beinausfall des rechten Mittelbeins (MR) simuliert. Bei Sekunde 52 wird der Ausfall des linken Mittelbeins (ML) simuliert.

Nach der Deaktivierung des rechten Mittelbeins bei Sekunde 0 sind die Stemmphasen des linken Vorderbeins in unregelmäßigen Abständen durch den Verlust des Bodenkontakts unterbrochen. Dies gilt analog für das linke Mittelbein und das linke Hinterbein. Das rechte Hinterbein detektiert nahezu durchgängig Bodenkontakt bis Sekunde 60. Das rechte Vorderbein besitzt regelmäßige lange Phasen, in denen es Bodenkontakt detektiert. Die Bodenkontaktphasen sind durch kurze Verluste des Bodenkontakts unterbrochen.

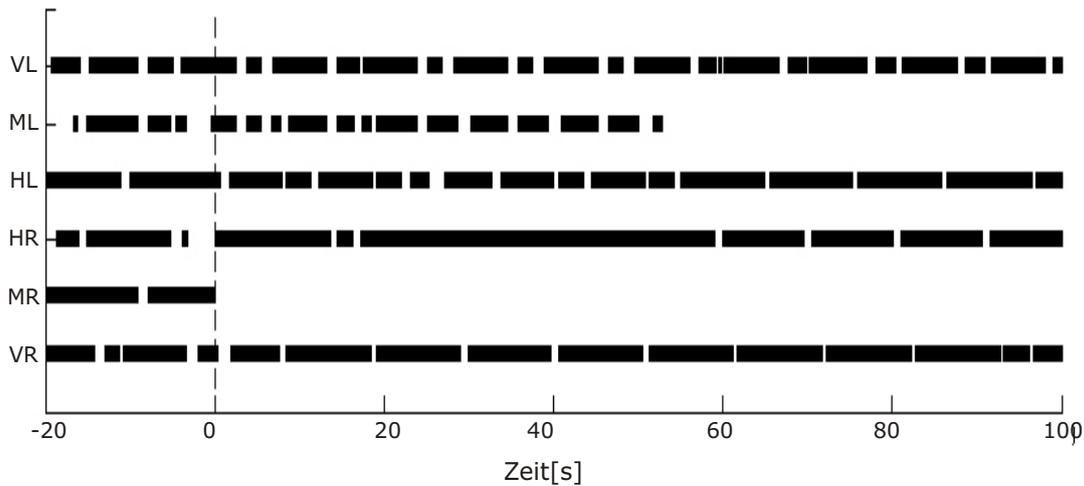


Abbildung 6.7: Schrittmusterdiagramm: Erste Amputation bei Sekunde 0, zweite Amputation bei Sekunde 52

6.2.2.2 Auswertung

Das Schrittmuster des ersten Beinausfalls bei Sekunde 0 bis zum zweiten Beinausfall bei Sekunde 52 weist starke Ähnlichkeit zu dem Schrittmuster aus Abschnitt 6.2.1 auf. Es sind dieselben Auffälligkeiten zu erkennen, auf die in Abschnitt 6.2.1 eingegangen wird.

Ab dem zweiten Beinausfall bei Sekunde 52 scheint sich das Schrittmuster zu stabilisieren. Dies ist besonders gut in den regelmäßigen Bodenkontaktphasen der Hinterbeine zu erkennen. Dieser Effekt lässt sich durch ein rhythmisches Hin- und Her-Schwanken der Maschine erklären. Während bei der Untersuchung des Laufverhaltens für den Ausfall des rechten Mittelbeins ein rechtslastiges Kippen festgestellt werden konnte, kann bei dem Ausfall beider Mittelbeine ein abwechselndes Kippen in beide Richtungen beobachtet werden. Dadurch scheint jedes Bein in regelmäßigen Abständen entlastet zu werden.

Auch wenn in dem vorgestellten Diagramm ein Schrittmuster erkennbar ist, ist das Laufverhalten stark beeinträchtigt. Theoretisch sollte die dezentrale Beinsteuerung durch die Aktualisierung der Nachbarschaftsbeziehungen in der Lage sein, zwei Beinausfälle kompensieren zu können. Praktisch stellt der Ausfall von zwei Beinen eine sehr kritische Situation dar.

Da auch schon bei einem Beinausfall auffällige Unregelmäßigkeiten auftreten, sollten neben der Aktualisierung der Nachbarschaftsbeziehung weitere Reaktionen beziehungsweise Anpassungen an diese Situation ausgelöst werden.

Im folgenden Abschnitt werden zwei Effekte, die sich auf das Gesamtverhalten der Maschine auswirken, und eine durch eine OCU ausgelöste Anpassung vorgestellt.

6.2.3 Zielfolgeverhalten mit Beinausfall

Nachdem im letzten Abschnitt die Laufmustergenerierung nach Ausfall von einem und von zwei Beinen untersucht wurde, wird in diesem Abschnitt untersucht, welche Auswirkungen der Ausfall eines Beins auf ein höheres Verhalten hat. Dazu wurde ein zielsuchendes (homing) Verhalten auf der Laufmaschine ausgeführt und unter kontrollierten Bedingungen die Folgen eines simulierten Beinausfalls untersucht.

6.2.3.1 Experimenteller Aufbau

Die Laufmaschine wird mit einem Wärmesensor, befestigt auf dem Körper des Roboters, ausgestattet. Der Wärmesensor kann über einen eigenen Servomotor bewegt werden und schwenkt in definierten Abständen von rechts nach links und wieder zurück. Detektiert der Sensor eine Wärmequelle, wird der Servomotor gestoppt und seine aktuelle Position ausgelesen. Über die Position des Servomotors kann die Ausrichtung der Wärmequelle relativ zu der definierten Front der Maschine abgeleitet werden.

Abhängig von der Ausrichtung der detektierten Wärmequelle wird der unter Abschnitt 5.2 beschriebene Kurvenlauf gestartet. Der Abstand zwischen PEP und AEP wird für das entsprechende Vorderbein verkürzt. Der Betrag der Abstandsverkürzung ist abhängig von der Position des Servomotors, der die Sensoren schwenkt.

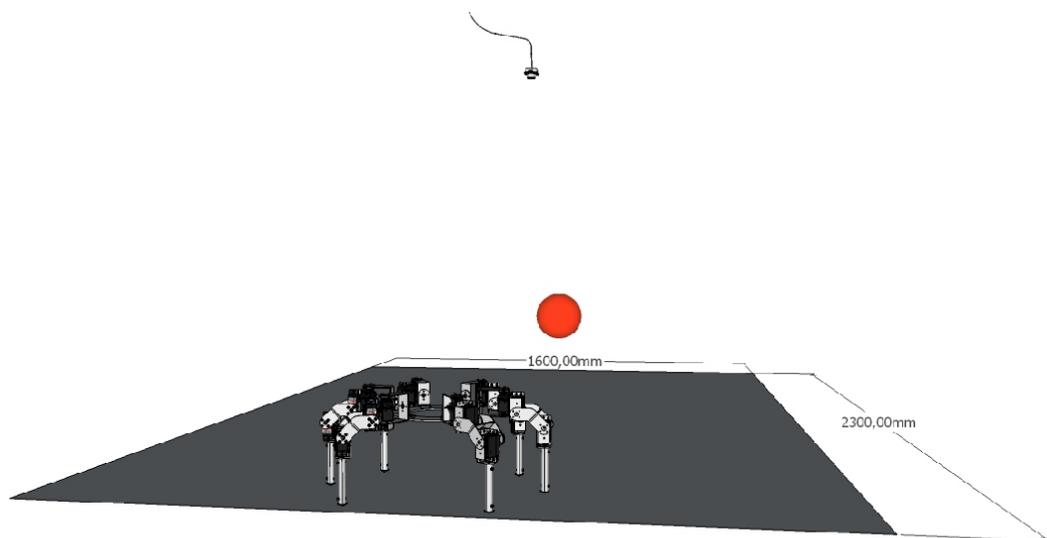


Abbildung 6.8: Modellierter Aufbau Testgelände. 160 *cm* breit und 230 *cm* tief; die rote Sphäre symbolisiert die Wärmequelle.

Das Testgelände ist eine ebene, 160 *cm* breite und 230 *cm* tiefe Fläche. Die Maschine startet auf dieser Fläche und läuft solange geradeaus, bis sie eine Wärmequelle detektiert. Mit Detektion der Wärmequelle richtet sich die Maschine nach dieser aus und läuft auf

sie zu. In einem Zeitraum von 10 bis 15 Sekunden nach dem Start wird ein Beinausfall simuliert. Mit Erreichen der Wärmequelle endet das Experiment.

Eine Deckenkamera in 310 *cm* Höhe, zentriert über dem Testgelände, filmt den Roboter während des Experiments. Der Roboter ist mit zwei Farbmarkern gekennzeichnet: einem im Körperzentrum und einem an der Frontseite. Eine Tracking-Software zeichnet die Position der beiden Marker im Bild auf. Zusätzlich aktiviert die Maschine ein blaues Licht an ihrer Oberseite, sobald sie eine Wärmequelle detektiert hat. Das blaue Licht wird von der Tracking-Software aufgenommen und mit einem Zeitstempel abgespeichert.

Abbildung 6.8 zeigt den Experimentaufbau mit Roboter, Deckenkamera und Wärmequelle in einer modellierten Szene. Die Wärmequelle wird durch eine rote Sphäre symbolisiert.

6.2.3.2 Experimentelle Ergebnisse der Referenzläufe

Für die Auswertung der Ergebnisse und die Untersuchung der Auswirkungen eines Beinausfalls werden Referenzläufe vorgestellt. Während der Referenzläufe wurden die Bewegungsdaten des Roboters für drei Testszenarien aufgenommen: einem Geradeauslauf, einem Linkskurvenlauf und einem Rechtskurvenlauf. Abbildung 6.9 zeigt die Lauftrajektorien der Laufmaschine aus der Deckenkameraperspektive. In einem X-Y-Koordinatensystem sind für jedes Szenario Positionen und Orientierung der Laufmaschine dargestellt. Die X-Achse zeigt die Tiefe und die Y-Achse die Breite des Testgeländes in *cm* an. Der Robotermittelpunkt ist mit einem Kreis und seine Orientierung mit einem Pfeil markiert. Eine Raute markiert die Position der Wärmequelle. Zeitangaben in jedem Diagramm geben zusätzliche Informationen über die Zeit, zu der das Ziel detektiert wird (t_d), und die Zeit, zu der das Ziel erreicht wird (t_z). Der Ort der Detektion wird in den Diagrammen zusätzlich mit einem roten Pfeil markiert. Der Startort der Maschine ist mit $t = 0$ markiert. Der Zeitpunkt t_d und der rote Pfeil zur Markierung des Detektionsortes des Ziels sind nur für die Kurvenläufe angegeben.

In Abbildung 6.9 oben links ist das Referenzergebnis für einen Geradeauslauf abgebildet. Der Roboter und das Ziel befinden sich auf derselben Y-Position. Zum Erreichen des Ziels, der Wärmequelle, braucht der Roboter 57 Sekunden. Zum Ende des Laufs setzt eine leichte Linksdrift ein.

In der Abbildung 6.9 unten links ist das Referenzergebnis für einen Linkskurvenlauf dargestellt. Der Roboter startet bei der X/Y-Position 230/120. Das Ziel befindet sich bei Position 40/20. Es ist ein gerader Lauf zu erkennen, bis die Maschine bei Sekunde 28 das Ziel detektiert. Von diesem Zeitpunkt an läuft die Maschine eine Linkskurve. Kurz vor dem Erreichen des Ziels ist eine leichte Linksdrift zu erkennen. Insgesamt braucht die Maschine 71 Sekunden vom Start bis zum Erreichen des Ziels.

In Abbildung 6.9 unten rechts ist das Referenzergebnis für einen Rechtskurvenlauf dargestellt. Der Roboter startet bei der X/Y-Position 230/90. Das Ziel befindet sich bei Position 20/155. Der Roboter ist bereits zu Beginn der Messung nicht parallel zur X-Achse ausgerichtet. Es ist ein gerader Lauf zu erkennen, bis die Maschine bei Sekunde 26 das Ziel detektiert. Von diesem Zeitpunkt an läuft die Maschine eine Rechtskurve. Kurz vor dem Erreichen des Ziels ist auch hier eine leichte Linksdrift zu erkennen. Insgesamt braucht die

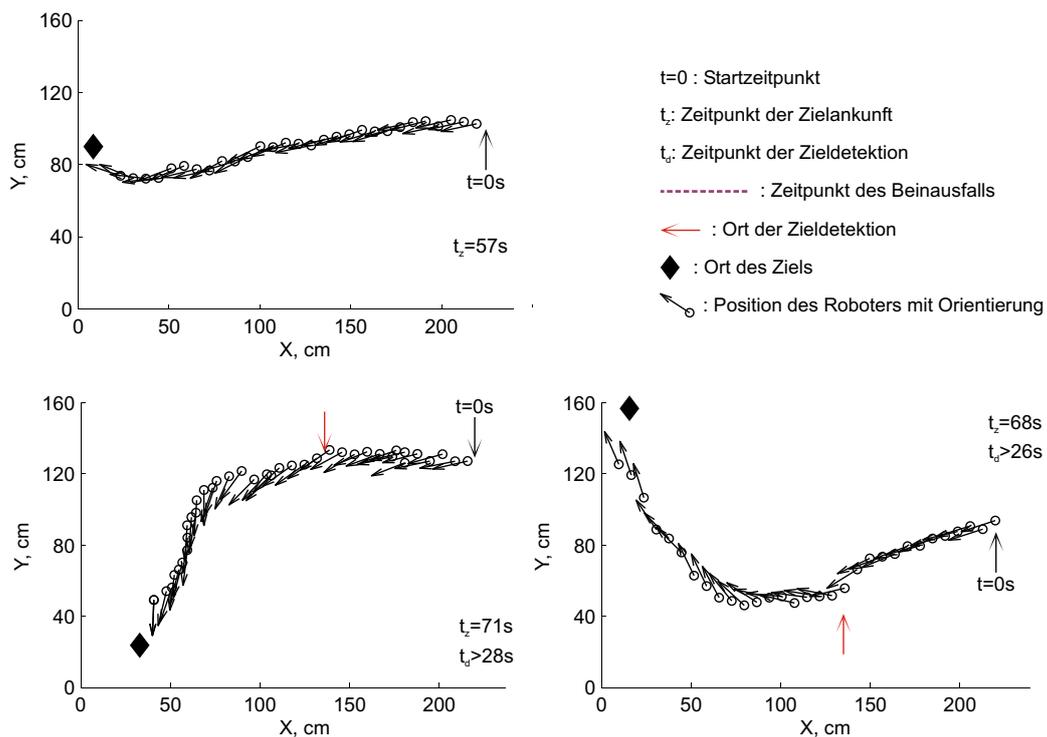


Abbildung 6.9: Lauftrajektorien der Roboterplattform ohne Amputation. Draufsicht auf das Testgelände ($230\text{ cm} \times 160\text{ cm}$) mit Raute als Wärmequelle. Der Roboter wird durch einen Kreis und seine Orientierung durch einen Pfeil symbolisiert.

Maschine 68 Sekunden vom Start bis zum Erreichen des Ziels.

Auswertung der Referenzläufe

Die Messdaten der Referenzläufe zeigen, dass das Zielfolgeverhalten auf der Laufmaschine ohne einen simulierten Beinausfall funktioniert. Der Roboter läuft geradeaus, bis er eine Wärmequelle detektiert und passt seine Laufrichtung in Abhängigkeit von der Zielorientierung an. Auch in dem Experiment zum Rechtskurvenlauf, in dem der Roboter zum Start nicht parallel zu der X-Achse ausgerichtet ist, funktioniert die Ausrichtung auf das Ziel nach der Detektion der Wärmequelle. In jedem der drei Ergebnisse ist eine Linksdrift zu erkennen. Diese Linksdrift kann durch die Position des Wärmesensors auf dem Roboter erklärt werden. Für dieses Experiment wurde auf dem Roboter eine Halterung für verschiedene Sensoren ergänzt. Der Aufbau ist mit dem Wärmesensor, einer Funkkamera und einem Ultraschallsensor ausgestattet. Die drei Sensoren sind nach vorne ausgerichtet und können durch einen Servomotor gemeinsam geschwenkt werden. Die Funkkamera ist mittig angebracht und der Wärme- und der Ultraschallsensor rechts und links von der Kamera. Dadurch, dass der Wärmesensor vom Zentrum nach rechts verschoben ist, wird

er bei der Rotation des Servomotors nicht um seine eigene, sondern um die Hochachse der Kamera geschwenkt.

Aufgrund der geringen Auflösung des Wärmesensors wurde der Zielfokus für eine Wärmequelle auf das Zentrum des wahrnehmbaren Bereichs des Wärmesensors gelegt. Der Versatz des Wärmesensors zum Zentrum des Roboters verursacht bei geringer werdenden Distanzen zum Ziel einen Versatz des Roboterzentrums zum Ziel.

6.2.3.3 Experimentelle Ergebnisse eines Ausfalls des linken Mittelbeins

Im Folgenden werden die Ergebnisse für das Zielfolgeverhalten unter Einfluss des Ausfalls des linken Mittelbeins untersucht und ausgewertet. Abbildung 6.10 ist entsprechend Abbildung 6.9 aufgebaut. Ergänzend wird hier der Beinausfall mit einer violetten, unterbrochenen Linie eingezeichnet.

Abbildung 6.10 oben links zeigt das Ergebnis für einen Geradeauslauf mit dem Ausfall des linken Mittelbeins. Der Roboter startet an Position 230/100. Das Ziel befindet sich an Position 5/90. Mit dem Einsetzen des Beinausfalls setzt eine starke Linksdrift ein. Die Maschine richtet sich während ihres Laufs auf das Ziel aus, entfernt sich aber wieder bis auf einen Abstand von 50 cm vom Ziel. Bis zum Ende des Experiments vergehen 85 s.

In Abbildung 6.10 unten links ist das Ergebnis für einen Linkskurvenlauf dargestellt. Der Roboter startet bei der Position 230/150. Das Ziel befindet sich bei Position 35/20. Mit dem markierten Beinausfall setzen plötzliche Orientierungs- und Positionsänderungen der Maschine ein. Mit der Detektion des Ziels nach 20 s setzt der Linkskurvenlauf ein. Die Maschine läuft eine enge Linkskurve und richtet sich erst zum Ende des Experiments, nach 102 s, auf das Ziel aus.

In der Abbildung 6.10 unten rechts ist das Ergebnis für einen Rechtskurvenlauf dargestellt. Der Roboter startet bei der X/Y-Position 230/60. Das Ziel befindet sich bei Position 10/155. Bis zum Beinausfall ist ein gerader Lauf zu erkennen. Mit dem Beinausfall wird gleichzeitig das Ziel bei 13 s detektiert. Die Maschine ändert ihre Orientierung erst nach links und dann wieder nach rechts auf das Ziel zu. Bis zum Erreichen des Ziels nach 118 s sind unregelmäßige Änderungen in der Orientierung und der Position der Maschine zu erkennen.

Auswertung Beinausfall links

Die Messdaten dieser Ergebnisse zeigen, dass das Zielfolgeverhalten auf der Laufmaschine mit der Simulation des Ausfalls eines linken Beins im Vergleich zu den Referenzläufen eingeschränkt funktioniert. Mit dem Ausfall des linken Mittelbeins setzt zum einen eine starke Linksdrift ein und zum anderen treten plötzliche Orientierungsänderungen auf. Außerdem braucht die Maschine zwischen 30 und 50 Sekunden länger, um das Ziel zu erreichen.

Der Beinausfall auf der linken Körperseite verursacht die Linksdrift. Zusätzlich dazu wirkt die Linksbewegung, verursacht durch die Position des Wärmesensors, auf den Roboter. Zusammen führen diese Effekte dazu, dass im Geradeauslauf und im Linkslauf das Ziel leicht verfehlt wird. Zusätzlich zu dem Linksdriften korrigiert die Maschine im Links-

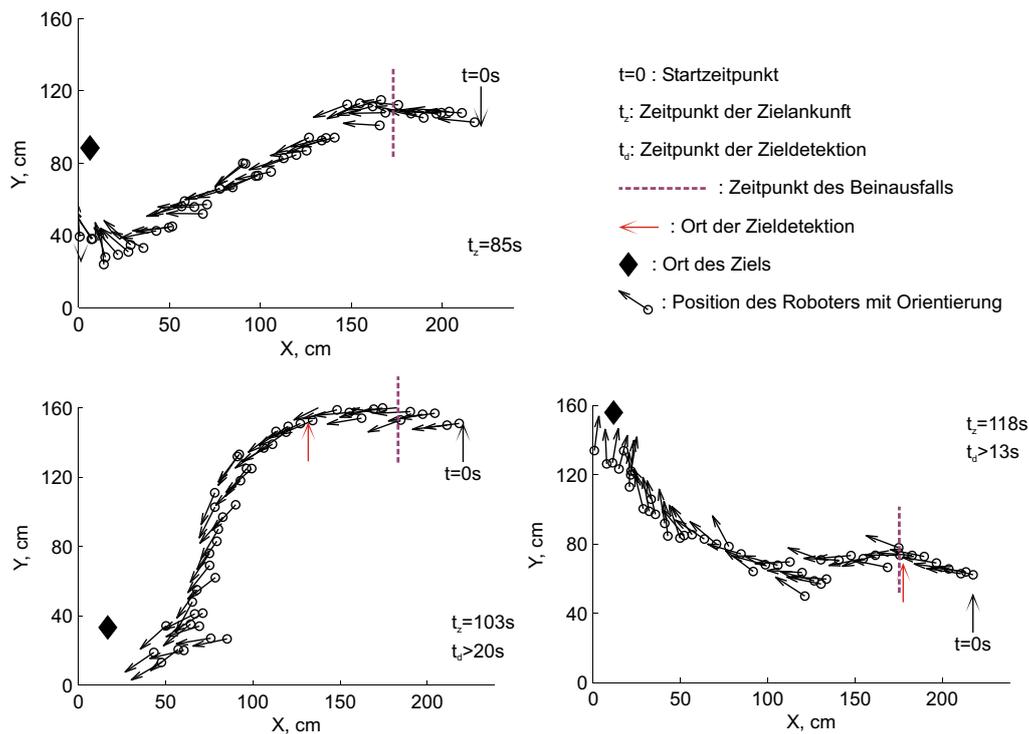


Abbildung 6.10: Lauftrajektorien der Roboterplattform mit Beinausfall links. Draufsicht auf das Testgelände ($230 \times 160 \text{ cm}$) mit Raute als Wärmequelle. Der Roboter wird durch einen Kreis und seine Orientierung durch einen Pfeil symbolisiert.

kurvenlauf ihre Orientierung auf das Ziel zu. Die Summe aller Linksbewegungen scheint dazu zu führen, dass die Maschine am Ziel vorbei läuft (siehe Abbildung 6.10).

Bei dem Rechtskurvenlauf ist leicht zu erkennen, dass das Ausrichten der Maschine nach rechts der Linksdrift regelmäßig entgegenwirkt. Die Ausrichtung des Roboters zum Ziel am Ende des Experiments erscheint besser als im Referenzlauf. Hier wirken die Eigenausrichtung und die Linksdrift einander entgegen. Dennoch braucht die Maschine hier mit Abstand die größte Zeitspanne, um das Ziel zu erreichen.

Die plötzlichen Orientierungs- und Positionswechsel der Maschine sind auf den zwischenzeitlichen Verlust der statischen Stabilität und des daraus resultierenden Kippens zurückzuführen. Die Maschine verliert kurzzeitig die Balance und kippt. Die Ursache für das Kippen ist in Abschnitt 6.2.1.4 erläutert. Nach einem kurzen Kippen wird die Maschine von dem schwingenden Bein, auf das sie zu kippt, aufgefangen. Die Tracking-Software arbeitet auf einem zweidimensionalen Bild und interpretiert die Bewegung des Roboters in die „Tiefe“ als schnelle Änderung der Orientierung und der Position.

6.2.3.4 Experimentelle Ergebnisse eines Ausfalls des rechten Mittelbeins

Im Folgenden werden die Ergebnisse für das Zielfolgeverhalten unter Einfluss des Ausfalls des rechten Mittelbeins untersucht und ausgewertet. Abbildung 6.11 ist entsprechend Abbildung 6.10 aufgebaut.

Abbildung 6.11 oben links zeigt das Ergebnis für einen Geradeauslauf mit dem Ausfall des rechten Mittelbeins. Der Roboter startet an Position 230/80 und das Ziel befindet sich an Position 5/95. Mit dem Einsetzen des Beinausfalls setzt eine starke Rechtsdrift ein. Die Maschine richtet sich während ihres Laufs wieder auf das Ziel aus. Bis zum Ende des Experiments nach 69 s sind plötzliche Orientierungs- und Positionswechsel erkennbar. Darüber hinaus ist ein leichtes Schwingen in der Lauftrajektorie zu erkennen. Das heißt, der Roboter läuft nicht auf direktem Weg zum Ziel, sondern „schwankt“ darauf zu.

In der Abbildung 6.11 unten links ist das Ergebnis für den Rechtskurvenlauf dargestellt. Der Roboter startet bei der Position 150/230. Das Ziel befindet sich bei Position 15/21. Mit dem markierten Beinausfall setzen plötzliche, sehr starke Orientierungs- und Positionsänderungen der Maschine ein. Mit der Detektion des Ziels nach 30 s setzt der Rechtskurvenlauf ein. Die Maschine läuft eine enge Rechtskurve. Auch hier ist ein leichtes Schwingen in der Lauftrajektorie erkennbar. Zum Ende des Experiments nach 119 s ist der Roboter auf das Ziel ausgerichtet.

In Abbildung 6.11 unten rechts ist das Ergebnis für einen Rechtskurvenlauf dargestellt. Der Roboter startet bei Position 230/40. Das Ziel befindet sich bei Position 20/155. Bis zum Beinausfall ist ein gerader Lauf zu erkennen. Mit dem Beinausfall tritt die erste plötzliche Positionsänderung auf. Das Ziel wird bei Sekunde 16 s detektiert. Hier treten kurz vor dem Erreichen des Ziels starke Positions- und Orientierungsänderungen auf. Das Experiment endet nach 78 s.

Auswertung Beinausfall rechts

Auch die Messdaten der hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass das Zielfolgeverhalten auf der Laufmaschine mit der Simulation des Ausfalls eines rechten Beins im Vergleich zu den Referenzläufen eingeschränkt funktioniert. Analog zu der Linksdrift, die bei dem Ausfall des linken Mittelbeins auftritt, wird durch den Ausfall des rechten Mittelbeins eine starke Rechtsdrift verursacht. Schnelle Orientierungs- und Positionswechsel treten auch hier auf. Im Vergleich zu den Referenzläufen erreicht die Maschine das Ziel nach einer längeren Zeitspanne als ohne Beinausfall. Allerdings braucht die Maschine für den Geradeauslauf und den Rechtskurvenlauf weniger Zeit als mit dem Ausfall des linken Mittelbeins.

Die Rechtsdrift wirkt zum einen der Linksdrift, verursacht durch die Position des Wärmesensors, entgegen. Zum anderen wird die Rechtsdrift bei einem Rechtskurvenlauf verstärkt und führt zu einer zu starken Abweichung vom Kurs kurz vor Erreichen des Ziels. Während des Geradeaus- und des Linkskurvenlaufs scheint die Rechtsdrift einen vorteilhaften Effekt zu haben. Beim Geradeauslauf und beim Linkskurvenlauf ist das leichte Schwingen in der Lauftrajektorie gut zu erkennen. Diese Schwingung entsteht durch das Entgegenwirken von Rechtsdrift und der aktiven Eigenausrichtung des Roboters auf das Ziel.

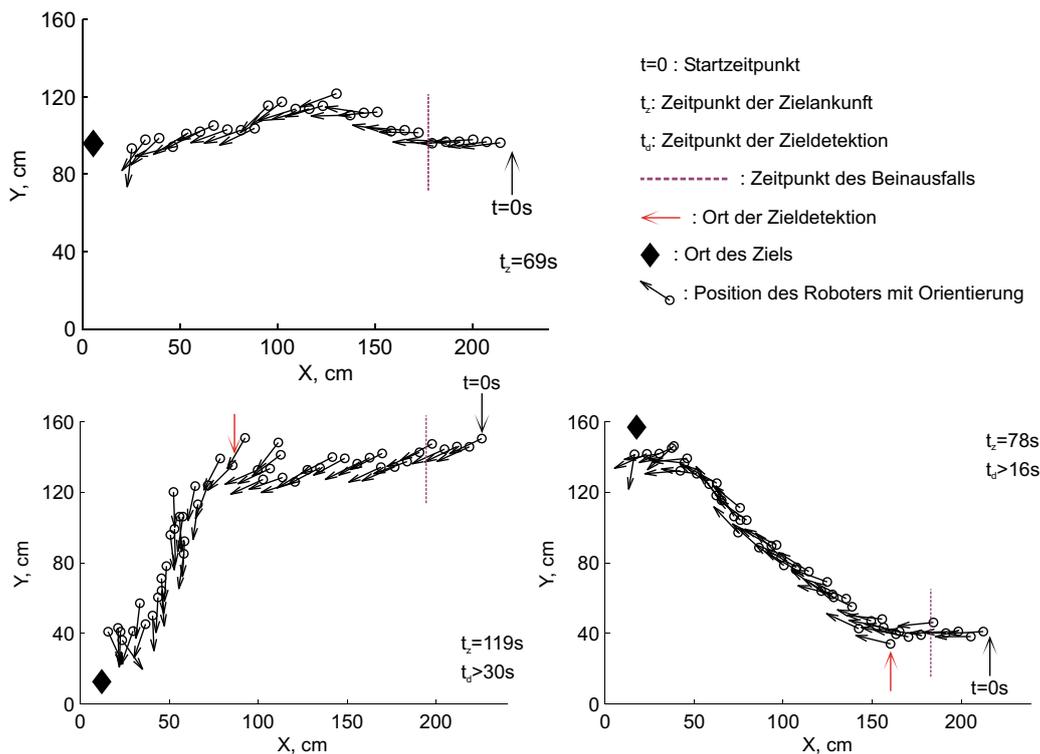


Abbildung 6.11: Lauftrajektorien der Roboterplattform mit Beinausfall rechts. Draufsicht auf das Testgelände ($230 \times 160 \text{ cm}$) mit Raute als Wärmequelle. Der Roboter wird durch einen Kreis und seine Orientierung durch einen Pfeil symbolisiert.

Besonders auffällig sind die plötzlichen, starken Orientierungs- und Positionswechsel, die als starkes Kippen der Maschine interpretiert werden können. Der häufige Verlust des Gleichgewichts, beziehungsweise der statischen Stabilität, ist vor allem bei dem Linkskurvenlauf zu erkennen.

6.2.3.5 Fazit

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die eingesetzte dezentrale Laufsteuerung ohne zusätzliche Eingriffe in der Lage ist, den Ausfall eines Beins zu kompensieren und ein Zielfolgeverhalten erfolgreich auszuführen. Allerdings beeinflussen die Effekte eines Beinausfalls die Geschwindigkeit und die Stabilität der Maschine. Neben den Richtungsabweichungen, verursacht durch die Beinausfälle, sticht vor allem der häufige, kurzzeitige Verlust des Gleichgewichts der Maschine hervor. Der regelmäßige kurzzeitige Gleichgewichtsverlust ist die Folge eines Beinausfalls. Der Beinausfall verringert allerdings auch die Möglichkeiten für die Stabilitätssicherung.

Auch wenn in diesem Abschnitt gezeigt werden konnte, dass die Laufsteuerung ohne weitere Eingriffe einen Beinausfall tolerieren kann, stellt sich die Frage, in wie weit ein Ein-

griff in die Steuerung und Koordination der Beine zu einer Verbesserung beziehungsweise zu einer Stabilitätssteigerung des Läufers beitragen kann.

6.2.4 Eingriff einer OCU

Im letzten Abschnitt konnte gezeigt werden, dass die in dieser Arbeit entwickelte Laufsteuerung adaptiv auf den Ausfall eines Beins das Schrittmuster anpasst und ein Zielfolgeverhalten ausgeführt werden kann. Allerdings treten regelmäßige Störungen in Form von Gleichgewichtsverlusten auf. Ein Gleichgewichtsverlust ist für die Laufmaschine eine kritische Situation, die vermieden werden muss. In diesem Abschnitt wird die Erweiterung der Laufsteuerung durch den Eingriff einer OCU vorgestellt. Der Eingriff ändert die Koordinationsregeln der direkten Nachbarbeine des ausgefallenen Beins. Das Ziel des Eingriffs in die Koordinationsregeln ist die Sicherung der Stabilität. Diese soll durch die Vergrößerung des Stützpolygons der Maschine erreicht werden.

Eine kritische Situation entsteht immer dann, wenn eines der Nachbarbeine des ausgefallenen Beins in die Schwingphase wechselt. In dieser Situation entsteht eine große Lücke zwischen den beiden intakten Nachbarbeinen. Wenn die beiden intakten Nachbarn die entstehende Lücke nicht minimieren, ist das Verhältnis zwischen projiziertem Masseschwerpunkt und Stützpolygon kritisch. Zur Minimierung der Lücke müssen sich die intakten Nachbarbeine aufeinander zubewegen.

In Abbildung 6.12 ist diese Situation schematisch dargestellt. Die Abbildung zeigt oben den Roboter mit einem ausgefallenen rechten Mittelbein. Kritische Situationen entstehen, wenn entweder das rechte Vorderbein oder das rechte Hinterbein in die Schwingphase wechselt. Die linke Spalte der Abbildung 6.12 beschreibt die Situation für das rechte Vorderbein und die rechte Spalte die Situation für das rechte Hinterbein. Das Bein, das in die Schwingphase wechselt, ist jeweils mit einer roten Umrahmung markiert. Ein schwarzer Pfeil im Zentrum des Roboters gibt die Laufrichtung an. Der rote Kreis im Zentrum der Maschine symbolisiert den Masseschwerpunkt. Für die intakten Nachbarbeine des rechten Vorderbeins sind die AEPs und für die intakten Nachbarbeine des rechten Hinterbeins die PEPs eingezeichnet. Gestrichelte Pfeile geben an, welche Informationen das entsprechende Bein vor dem Wechsel in die Schwingphase anfordert.

In der zweiten Zeile der Abbildung 6.12 sind jeweils die Stützpolygone vor dem Wechsel in die Schwingphase in Grau und nach dem Wechsel in die Schwingphase in Rosa zusammen mit dem Masseschwerpunkt dargestellt. Nach dem Wechsel in die Schwingphase liegt der Masseschwerpunkt auf der Grenze des Stützpolygons. Diese Situation ist kritisch. Sie führt in der Regel zum Verlust des Gleichgewichts des Roboters.

In Abbildung 6.12 unten sind die Stützpolygone eingezeichnet, die entstehen, wenn die intakten Nachbarbeine die entstandene Lücke zwischen sich verkleinern. Abhängig davon, ob das Bein vorne rechts oder hinten rechts in die Schwingphase wechselt, müssen sich die intakten Nachbarn nahe ihrer AEP oder nahe ihrer PEP aufhalten. In dieser Situation umschließt das Stützpolygon den projizierten Masseschwerpunkt des Roboters. Die Situation ist nicht mehr kritisch und ein Gleichgewichtsverlust der Maschine kann ausgeschlossen werden.

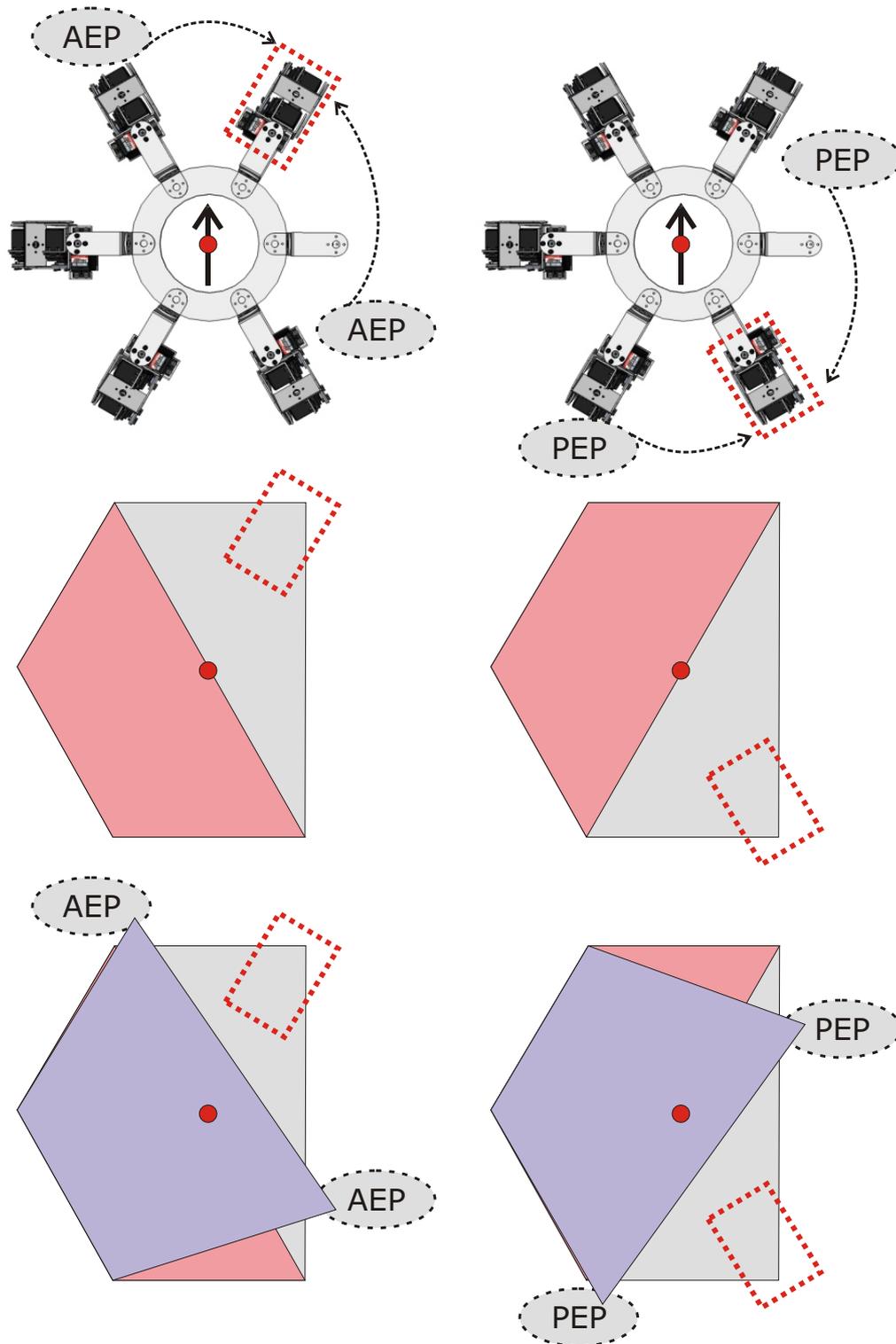


Abbildung 6.12: Schematische Darstellung für die Erweiterung der Koordinationsregel

6.2.4.1 Konzept und Umsetzung

Im Folgenden werden das Konzept und die Umsetzung des Eingriffs beschrieben, mit dem das Stützpolygon wie in Abbildung 6.12 unten verändert wird.

Wenn eine Bein-OCU über den Ausfall ihres Nachbarbeins informiert wird, muss in die Koordinationsbedingungen des eigenen Beins eingegriffen werden, um die oben beschriebene kritische Situation zu vermeiden. Die Koordinationsbedingung muss sicherstellen, dass das Stützpolygon den Masseschwerpunkt des Roboters umschließt. Das wird erreicht, indem das Bein nur dann in die Schwingphase wechseln darf, wenn seine intakten Nachbarbeine nahe ihren Extrempositionen sind. Ob ein Nachbarbein nahe seiner AEP oder nahe seiner PEP sein muss, ist abhängig von seiner Position relativ zum schwingenden Bein und seiner Bewegungsrichtung. Dabei wird der Bereich um die Extremposition um einen vordefinierten Wert δ erweitert: $AEP \pm \delta$ und $PEP \pm \delta$.

Das bedeutet konkret folgendes: Die Beine des Roboters sind im Uhrzeigersinn aufsteigend durchnummeriert. Je nach Körperseite schwingen sie im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn. Die Beine auf der linken Körperseite schwingen gegen den Uhrzeigersinn und die Beine auf der rechten Seite schwingen im Uhrzeigersinn.

Soll ein Bein i als Nachbarbein des ausgefallenen Beins in seine Schwingphase wechseln, müssen seine intakten Nachbarn in der Stemmphase sein und zusätzlich nahe einer Extremposition. Die Extremposition, bei der sich Bein $i - 1$ befinden muss, ist die PEP für den Fall, dass dieses Bein gegen den Uhrzeigersinn schwingt und die AEP, falls es im Uhrzeigersinn schwingt. Der letzte Fall entspricht in der Abbildung 6.12 der Situation oben rechts. Für Bein $i + 1$ gilt bei einer Schwingbewegung gegen den Uhrzeigersinn die AEP und bei einer Schwingbewegung im Uhrzeigersinn die PEP [35].

Tabelle 6.1: Abhängigkeiten für den Eingriff in die Koordinationsregel: die Extrempositionen AEP und PEP für die Koordinationsregel hängen von den Nachbarbeinen $i - 1$ und $i + 1$ und ihrer Schwingrichtung, im oder gegen den Uhrzeigersinn (UZS), ab.

	i-1		i+1	
Schwingrichtung	gegen UZS	im UZS	gegen UZS	im UZS
Extremposition	PEP	AEP	AEP	PEP

Tabelle 6.1 gibt die möglichen Situationen an. Abhängig davon, ob Bein $i - 1$ oder Bein $i + 1$ und der zugehörigen Schwingrichtung im oder gegen den Uhrzeigersinn (UZS) gilt die angegebene Extremposition für das Nachbarbein. Diese Erweiterung gilt für alle bisher eingeführten Bewegungsmuster. Auch wenn sich der Roboter auf der Stelle um seine eigene Hochachse dreht und jedes Bein dieselbe Schwingrichtung hat, führt dieser Eingriff zu der Vergrößerung des Stützpolygons.

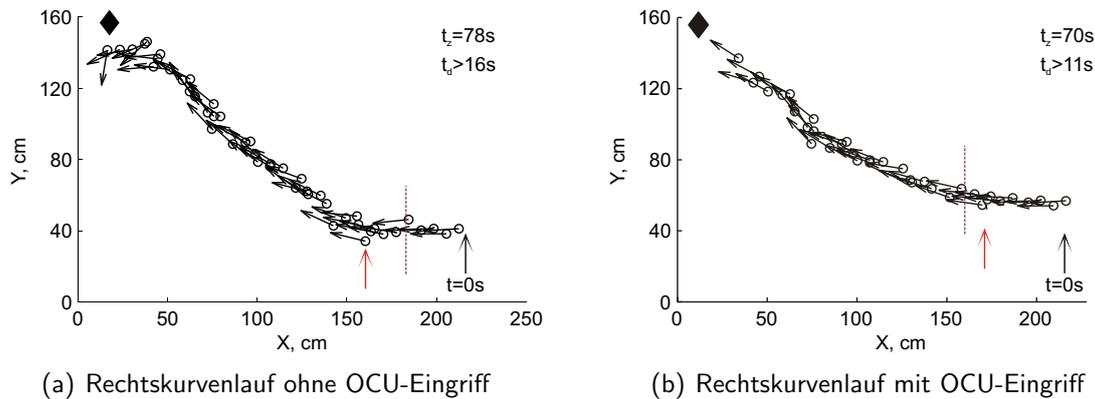


Abbildung 6.13: Vergleich der Ergebnisse ohne und mit Eingriff einer OCU

6.2.4.2 Experimentelle Ergebnisse

Der experimentelle Aufbau entspricht dem Aufbau aus Abschnitt 6.2.3.1, bestehend aus: einem flachen Testgelände ($160\text{ cm} \times 230\text{ cm}$), einer Deckenkamera und einer Wärmequelle als Ziel. Im Folgenden wird exemplarisch das Ergebnis von einem Rechtskurvenlauf mit dem Ausfall des rechten Mittelbeins vorgestellt und analysiert. Abbildung 6.13(a) zeigt das Ergebnis aus Abschnitt 6.2.3 im direkten Vergleich zu Abbildung 6.13(b). Hier wird das Ergebnis für einen Rechtskurvenlauf mit einem Beinausfall im rechten Mittelbein und dem Eingriff der OCUs der Nachbarbeine in die Koordinationsregel gezeigt. Der Roboter startet bei Position $230/60$ und das Ziel befindet sich an Position $10/155$. Vom Startpunkt bis zum Ziel braucht der Roboter 70 Sekunden. Das Ziel wird ab Sekunde 11 erkannt. Bis zu Sekunde 11 ist eine gerade Trajektorie zu erkennen. Mit der Detektion des Ziels beginnt der Roboter eine Rechtskurve zu laufen. Die Trajektorie der Kurve verläuft bis kurz vor dem Ziel ohne größere Orientierungsänderungen der Maschine. Je näher die Maschine dem Ziel kommt, desto mehr plötzliche Änderungen in Orientierung und Position treten auf.

6.2.4.3 Auswertung

Im direkten Vergleich ist zu erkennen, dass der Roboter durch den Eingriff der OCU konstanter läuft und in der ersten Hälfte des Experiments weniger Orientierungs- und Positionswechsel auftreten. In der zweiten Hälfte des Experiments treten auch hier wieder Orientierungs- und Positionswechsel ein.

Dieser Effekt kann mit der Distanz zwischen Roboter und Hindernis erklärt werden. Je näher die Maschine dem Ziel kommt, desto enger werden die Kurven, die der Roboter für die eigene Neuausrichtung auf das Ziel laufen muss. Je enger die Kurven werden, desto kleiner wird der Abstand zwischen den Extrempositionen PEP und AEP (siehe dazu Abschnitt 5.2 zum Kurvenlauf). Die PEP und AEP werden bei einer Distanzverringerng auf die Mittelstellung des Beins zubewegt. Die Extremposition des Nachbarbeins, von der der OCU-Eingriff abhängt, wird somit unvorteilhaft verschoben. Das führt zu einer

Verkleinerung des Stützpolygons. Der Roboter ist bei enger werdenden Kurven wieder der Gefahr des Gleichgewichtsverlustes ausgesetzt.

Ein einfacher Lösungsansatz, um diesem Effekt vorzubeugen, ist die Einführung von einem Mindestkurvenradius für den Kurvenlauf im Falle eines Beinausfalls. Weitere Arbeiten, die im Rahmen des ORCA-Projekts zur Selbst-Rekonfiguration der funktionsfähigen Beine nach einem oder mehreren Beinausfällen untersucht wurden, sind durch Prinzipien der „Schwarmintelligenz“ inspiriert [67, 68, 69]. Darüber hinaus werden auch Online-Lernverfahren zur Selbstoptimierung von Maschinen im Rahmen des ORCA-Projekts untersucht [100] sowie der Einsatz adaptiver Filter für zuverlässige Steuerungen autonomer Roboter [51].

Kapitel 7

Fazit und Ausblick

7.1 Ergebnisse der Arbeit

Die bearbeiteten Themen dieser Arbeit lassen sich zusammenhängend in den Entwurf einer biologisch inspirierten Laufsteuerung und die darauf aufbauenden Reflexe als Erweiterung sowie die Untersuchung der Robustheit des Gesamtsystems bei starken Störungen zusammenfassen. Für die Steigerung der Robustheit wurden mögliche Reaktionen präsentiert und untersucht. Zusätzlich zu diesen zusammenhängenden Themen wurden Reflexe auf Gelenkebene behandelt und gezeigt, dass mittels Reflexkombination und Übertragung der Koordinationsregel alternativ zu den vorgestellten Konzepten ein Laufmuster generiert werden kann. Für die Umsetzung der untersuchten Konzepte wurde das ORCA-Konzept, bestehend aus den beiden Modultypen BCU und OCU, genutzt. Die untersuchten Themenbereiche werden im Folgenden genauer ausgeführt:

Biologisch inspirierte Steuerung: Die Natur hält bereits Konzepte und grundlegende Prinzipien für die Steuerung mehrsegmentiger Gliedmaßen bereit. Dank der Forschungen auf dem Gebiet der biologischen Kybernetik steht Ingenieuren inzwischen auch biologisches Wissen über die Grundlagen des Laufens zur Verfügung. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit basieren auf diesen Erkenntnissen aus der Biologie. Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass durch den Einsatz einer dezentralen Kontrollstruktur, basierend auf lokalen Regeln, selbstorganisierende Mechanismen angestoßen werden können, die zu einem emergenten Schrittmuster führen. Abhängig von der vorgegebenen Geschwindigkeit der Laufmaschine werden sowohl definierte Schrittmuster als auch Übergangsformen von Schrittmustern adaptiv und emergent generiert. Auch das Kurvenlaufen konnte, angelehnt an Ergebnisse aus der Biologie, adaptiv umgesetzt werden.

Adaptivität: Es wurde das Konzept der gelenkbasierten, aktiven Nachgiebigkeit vorgestellt und die Adaption sowohl einzelner Gelenke als auch des Gesamtsystems an extern wirkende Kräfte untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass ein auf lokalen Regeln basierendes Laufverhalten rein reaktiv als Adaption an eine externe Kraft selbstorganisierend entstehen kann.

Neben den adaptiven Schrittmustern und dem adaptiven Kurvenlaufen wurde die Steuerung um den elementaren Bodendetektionsreflex erweitert. Die Umsetzung des Reflexes basiert auf der Auswertung propriozeptorischer Signale. Durch diesen Reflex kann das Schrittmuster an die Unebenheiten des Untergrunds angepasst werden.

Zuverlässigkeit: Durch die Erweiterung der Laufsteuerung um den Suchreflex und den Levatorreflex kann die Zuverlässigkeit der Laufsteuerung bei der Konfrontation mit Hindernissen untersucht werden. Die Aktivierung der Reflexe schützt die Laufsteuerung davor, die Roboterplattform in unsichere oder instabile Situationen zu bringen. Mit dem Suchreflex können Lücken detektiert, überwunden oder im Zweifel die Maschine gestoppt werden. Mit dem Levatorreflex können Hindernisse mit Beinhöhe überwunden oder unüberwindbare Hindernisse detektiert werden. Es wurde gezeigt, dass die Umsetzung dieser Reflexe auf propriozeptorischen Signalen basieren kann. Alle bisher vorgestellten Punkte wurden mit dem Modultyp BCU aus dem ORCA-Framework implementiert.

Robustheit: Mit Deaktivierung von einem und von zwei Beinen wurde der Bewegungsapparat gezielt gestört und behindert, um die Robustheit des Systems zu untersuchen. Durch die Einführung von OCUs konnte gezeigt werden, in welchem Maße Ausfälle von Beinen kompensiert werden können, und ab wann das System an seine Grenzen stößt. Eine Steigerung der Systemrobustheit wurde durch die Einführung eines OCU-Eingriffs in die Steuerung und die lokalen Koordinationsregeln erreicht.

7.2 Ausblick

Aufbauend auf den Konzepten und Umsetzungen dieser Arbeit kann die Laufsteuerung in verschiedene Richtungen erweitert und optimiert werden. Durch eine Optimierung der Hardware könnten die Nachgiebigkeitsreflexe auf Gelenkebene in die Stemmphase der Beine integriert werden. Nach den Ergebnissen zum reaktiven Laufen als Reaktion auf eine externe Kraft kann davon ausgegangen werden, dass das Geradeaus- und das Kurvenlaufen durch die Integration der Reflexe optimiert werden kann. Die aktive Ansteuerung ausgewählter Gelenke in Kombination mit der Nachgiebigkeit der übrigen Gelenke entspricht dem biologischen Kurvenlauf einer Stabheuschrecke [28, 33].

Die Adaption des Laufens an Steigungen, an rutschigen und an instabilen Untergrund stellt eine wichtige Erweiterung dar. Es können problemlösende Verhalten untersucht und ausgewertet werden. Es kann die Reaktionen der Maschine auf eine plötzliche Gewichtszunahme, auf das Verkeilen eines Beins oder das Aufstehen aus beliebigen Positionen untersucht werden.

In dieser Arbeit wurde die extreme Anomalie eines Beinausfalls untersucht. Es bleibt die Fragen offen, in wie weit schwächere Anomalien detektiert und kompensiert werden können. Die Untersuchung langfristiger Anomalien wie der Verschleiß der Hardware sowie die Untersuchung passender Gegenmaßnahmen stellt ebenfalls eine mögliche Erweiterung dar. Auch eine Anpassung an die Änderung von Segmentlängen kann untersucht werden.

Ein weiterer Punkt ist die Übertragung der in dieser Arbeit untersuchten Konzepte zur Adaptivität, Zuverlässigkeit und Robustheit auf Verhaltens- und Planungsebene sowie die Übertragung auf weitere Roboterplattformen.

Anhang A

Anhang

Inhalt

A.1	Schrittreflex	132
A.2	Bodendetektion	133
A.3	Suchreflex	134
A.3.1	Bodendetektion im Zustand „Suche Vorne“	134
A.3.2	Keine Bodendetektion	135

A.1 Schrittreflex

In Abbildung A.1 sind Messergebnisse für die Untersuchung des Schrittreflexes im β - und γ -Gelenk abgebildet. Das Diagramm zeigt den Stromverbrauch für die Winkelwerte

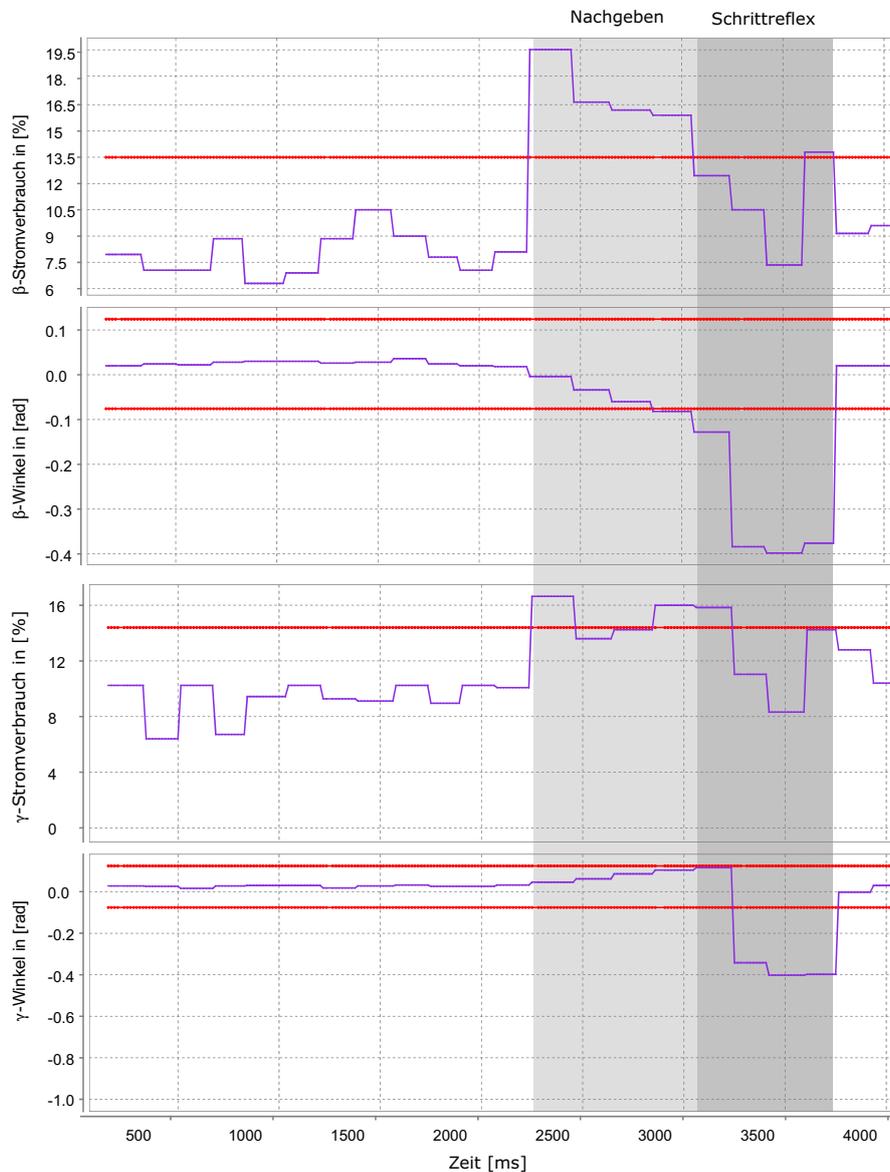


Abbildung A.1: Messwerte für den Schrittreflex von innen nach außen.

für die Gelenke β und γ über die Zeit. Die Schwellwerte im Stromverbrauch und die Arbeitsbereichsgrenzen sind im jeweiligen Diagramm in Rot eingezeichnet. Die Messdaten beschreiben die Reaktion auf eine extern wirkende Kraft. In Hellgrau ist die Nachgiebigkeitsreaktion der Gelenke β und γ hinterlegt. Die Nachgiebigkeitsreaktion entspricht

im β -Gelenk einer Depression und im γ -Gelenke einer Extension. In Dunkelgrau ist der Schrittreflex hinterlegt. Der Schrittreflex wird ausgelöst, sobald entweder der β - oder der γ -Winkelwert den vordefinierten Arbeitsbereich über- oder unterschreitet. In diesem Fall unterschreitet der Winkel des β -Gelenks seinen Arbeitsbereich bei Sekunde 3100. Der Schrittreflex wird von innen nach außen ausgeführt und bewegt die Winkel β und γ wieder zurück in ihre optimalen Arbeitsbereiche.

A.2 Bodendetektion

In Abbildung A.2 ist die Bodendetektion über den Stromverbrauch im β -Gelenk gezeigt. Es sind die Winkelwerte und der Stromverbrauch über die Zeit aufgetragen. Stemmphasen sind in Gelb und Schwingphasen in Weiß hinterlegt. In den Absenckphasen wird der Schwellwert berechnet. Er ist in Rot in das Diagramm des Stromverbrauchs eingezeichnet. An den größer werdenden Streckungen in den Winkelwerten des β -Gelenks kann abgelesen werden, dass das Bein stufenweise nach unten tritt.

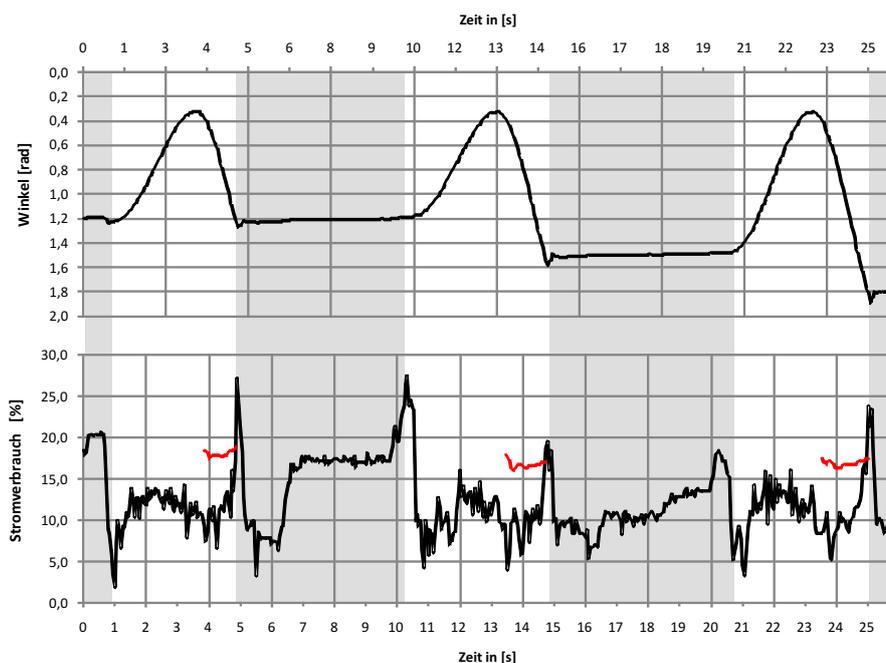


Abbildung A.2: Winkel- und Stromwerte über die Zeit für ein β -Gelenk beim Lauf des Roboters im Testgelände aus Abschnitt 5.3.6.2.

A.3 Suchreflex

A.3.1 Bodendetektion im Zustand „Suche Vorne“

Abbildung A.3 zeigt die in Abschnitt 5.3.7.2 vorgestellte Variante 1 des Suchreflexes. Der Suchreflex führt eine Suchbewegung nach vorne aus und detektiert Bodenkontakt. Es sind die Winkelwerte und die Stromverbräuche des β -Gelenks über die Zeit abgetragen. Die Schwingphase ist in Weiß und die Suchbewegung nach vorne in Grau hinterlegt.

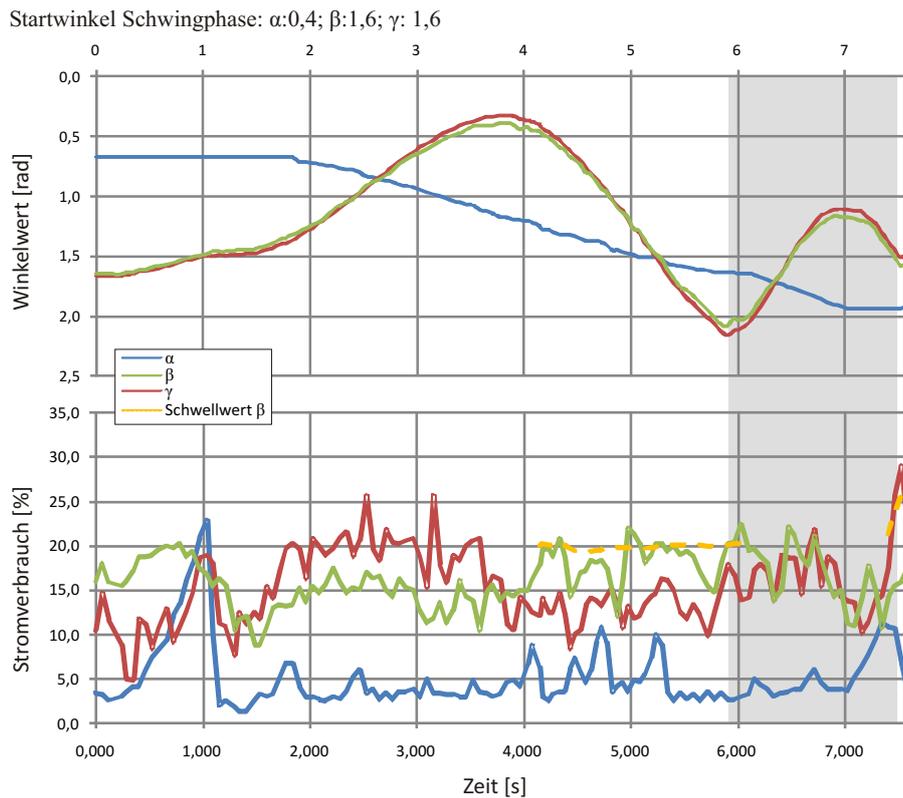


Abbildung A.3: Messwerte zeigen einen Suchreflex mit der Detektion des Bodenkontakts im Zustand „Suche vorne“.

A.3.2 Keine Bodendetektion

Abbildung A.4 zeigt die in Abschnitt 5.3.7.2 vorgestellte Variante 3 des Suchreflexes. Der Suchreflex führt eine Suchbewegung nach vorne und anschließend eine Suchbewegung nach hinten aus. Es wird kein Bodenkontakt detektiert und das Laufverhalten muss gestoppt werden. Es sind die Winkelwerte und die Stromverbräuche des β -Gelenks über die Zeit abgetragen. Die Schwingphase ist in Weiß, die Suchbewegung nach vorne in dunklem Gelb und die Suchbewegung nach hinten in hellem Gelb hinterlegt.

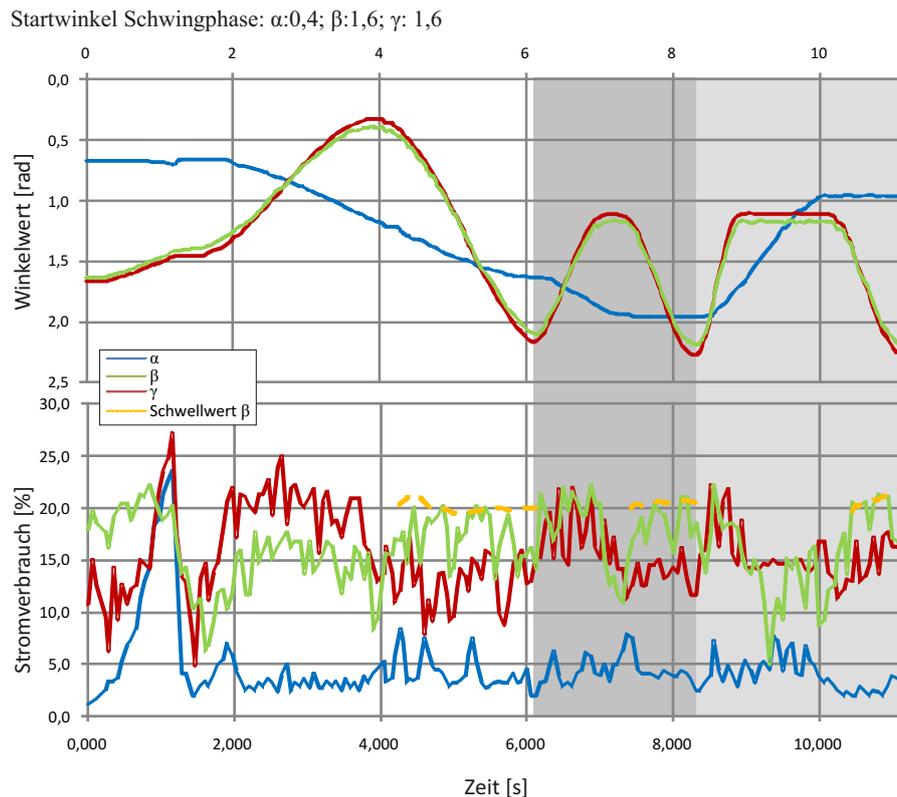


Abbildung A.4: Messwerte zeigen einen Suchreflex ohne Detektion des Bodenkontakts.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Der DLR-Crawler. (Mit freundlicher Genehmigung von Martin Görner) . . .	12
2.2	Der Laufroboter Lauron IVc © FZI Forschungszentrum Informatik	13
2.3	Der Roboter AMOS-WD06. (Mit freundlicher Genehmigung von Poramate Manoonpong)	14
2.4	Die Laufmaschine ANTON © 2007 RobotsLab.	15
2.5	Die Laufmaschine Tarry IIb. (Mit freundlicher Genehmigung von Josef Schmitz)	16
3.1	Aufbau einer Beinsteuerung des Walknets mit einzelnen Modulen: ein Schwing- und ein Stemmnetz zur Steuerung der Schwing- und Stembewegung, ein Zielnetz zur Bestimmung der nächsten Zielposition, ein Selektionsnetz zur Auswahl zwischen Schwing- und Stembewegung, ein Höhennetz zur Regulierung des Körperabstandes vom Untergrund und den Koordinationseinflüssen. α , β und γ sind die Gelenkwinkel. $\dot{\alpha}$, $\dot{\beta}$ und $\dot{\gamma}$ sind die Winkelgeschwindigkeiten für die entsprechenden Beingelenke. . .	24
3.2	Sechs Beinsteuerungen für die drei linken (L1, L2, L3) und die drei rechten Beine (R1, R2, R3) mit den unterschiedlichen Einflüssen der Koordinationsregeln. Die Pfeile zwischen einzelnen Beinen geben die Richtung an, in der die Regel wirkt. Ein „?“ an einem Pfeil gibt an, dass die neuronalen Zusammenhänge hier noch nicht im Detail geklärt sind. Jede Beinsteuerung entspricht dem in Abbildung 3.1 skizzierten Aufbau.	25
3.3	Schematischer Aufbau eines MCA2-Moduls unter a) mit Sensoreingaben und -ausgaben, Steuerungseingaben und -ausgaben und den internen Parametern und Variablen und unter b) die Skizzierung einer Gruppe von Modulen, zusammengefasst in einem Gruppenmodul	27
3.4	Beispielhafter Ausschnitt einer Robotersteuerung nach dem ORCA-Prinzip mit charakteristischer Interaktion von OCUs und BCUs auf zwei Ebenen (Planung und reaktives Verhalten). BCUs stehen untereinander ebenenübergreifend in Verbindung und werden von OCUs überwacht.	32
4.1	Foto und schematische Abbildung der hexapoden Laufmaschine OSCAR .	36
4.2	Arbeitsbereich des Beins	37

4.3	a) Schematische Darstellung eines Insektenbeins mit den Segmenten Coxa-Trochanter, Femur, Tibia und Tarsus und den Gelenken α , β und γ . b) schematische Darstellung des Roboterbeins mit den entsprechenden Segmenten, ohne Tarsus. Das α -Gelenk ist senkrecht zur Grundebene des Roboterkörpers, das β -Gelenk senkrecht zum α -Gelenk und das γ -Gelenk parallel zum β -Gelenk angeordnet.	38
4.4	Kommunikation der Hardwarekomponenten	38
4.5	3D Modell der Roboterplattform OSCAR	40
4.6	3D Modell in Simulation mit Umgebung	41
4.7	Kommunikation und Umsetzung der Simulationskomponenten	42
5.1	Schematische Darstellung der Stemm- und Schwingtrajektorie des Fußpunktes zwischen PEP und AEP.	47
5.2	Koordinationsregel: Bein i erwartet von den Nachbarbeinen $i - 1$ und $i + 1$ ein Bodendetektionssignal, bevor es von der Stemm- in die Schwingphase wechseln darf.	49
5.3	Moore-Automat zur Koordination der Stemm- und der Schwingphase eines Beins. Der Wert 1 entspricht einer Bodendetektion, der Wert 0 entspricht keiner Detektion des Bodens.	51
5.4	Stützpolygon des Roboter: a) Beispielhafte Situation mit vier Stützbeinen. Eine rote Sphäre markiert den Masseschwerpunkt. b) Schematische Darstellung des Stützpolygons aus a) mit den Fußpunkten X'_0 , X'_1 , X'_2 und X'_3 und dem projizierten Masseschwerpunkt M'	52
5.5	Mögliche Laufmuster für sechsbeiniges Laufen	53
5.6	Schrittmusterdiagramm. Das Verhältnis für die Stemm-Schwing-Geschwindigkeit ist oben angegeben. Die Stemmphasen sind in schwarz eingezeichnet. Verschiedene Schrittmuster und Übergänge sind farblich markiert.	54
5.7	Zusammenhänge zwischen der AEP-PEP-Distanz, der Stemmrichtung der Beine und der Laufrichtung der Maschine. Die AEP wird durch einen roten, die PEP durch einen grünen Punkt markiert. Die Stemmrichtungen und Stemmlängen werden durch einen schwarzen Pfeil, die Laufrichtung durch einen gepunkteten Pfeil angegeben.	57
5.8	Informationsfluss zwischen der Kurven-BCU und drei Bein-BCU einer Körperseite: Vorne Rechts (VR), Mitte Rechts (MR) und Hinten Rechts (HR)	58
5.9	Beispiele für passiv elastische Gelenke. a) Kombination aus Motor und Federn: Motor bewegt Segment über eine elastische Federkonstruktion. (©J.Schmitz und A.Schneider) b) Pneumatischer Muskel aus elastischem Schlauch: oben entspannt, unten durch Luftdruck im Schlauch kontrahiert.	60
5.10	Zusammenhang von wirkender Kraft, Strom und Winkeländerung. a) Stromverbrauch in % vom maximalen Stromverbrauch gegen eine wirkende Kraft $[N]$. b) Winkel gegen eine wirkende Kraft $[N]$	62

5.11	Nachgiebigkeitsreflex als Reaktion auf extern wirkende Kraft. Oberer Teil: Stromverbrauch des α -Gelenks in % über die Zeit. Der vordefinierte Schwellwert für den Stromverbrauch in Rot liegt bei 2,5%. Unterer Teil: Der Winkel des α -Gelenks über die Zeit.	64
5.12	Schematische Darstellung eines β - γ -Reflexes. I) Schrittreflex nach innen, zum Körper hin und II) Schrittreflex nach außen, vom Körper weg: a) externe Kraft \vec{F} wirkt auf das β - und γ -Gelenk; b) β - und γ -Gelenke geben nach; c) Schrittreflex wird ausgelöst; d) das Bein wird zurück in den optimalen Winkelbereich von β und γ gesetzt.	66
5.13	Nachgiebigkeit im α -Gelenk mit anschließendem Schrittreflex. Stromverbrauch des α -Gelenks in % und Winkelwerte über die Zeit. Der Schwellwert für den Stromverbrauch ist bei 2,5% und die Grenze des Arbeitsbereichs bei 0,46 rot eingezeichnet.	68
5.14	Nachgiebigkeit im β - und γ -Gelenk mit anschließendem Schrittreflex. Der Stromverbrauch der Gelenke in % und Winkelwerte über die Zeit. Der Schwellwert für den Stromverbrauch ist bei 14% für das β - und das γ -Gelenk angegeben. Die Intervallgrenzen [-0,19;0,21] des optimalen Arbeitsbereichs beider Gelenke sind rot eingezeichnet.	69
5.15	Schematische Darstellung der Auswirkung einer externen, horizontal wirkenden Kraft auf den Roboter: a) Kraft \vec{F} wirkt auf Roboter; b) Reaktion des Gesamtsystems; c) und d) vergrößerte Ansicht für a) und b) für ein α -Gelenk.	71
5.16	Ausschnitt aus einer Laufreaktion auf eine externe Kraft: Stromverbrauch und Gelenkwinkel über die Zeit für das α -, β - und γ -Gelenk des linken Vorderbeins. Grauer Hintergrund markiert die Nachgiebigkeit, weißer Hintergrund den Schrittreflex. Bodenkontakte des Beins sind durch schwarze Balken am oberen Rand gekennzeichnet.	73
5.17	Schrittmuster für das linke Hinter- (HL), Mittel- (ML), Vorder- (VL) und das rechte Vorder- (VR), Mittel- (MR) und Hinterbein (HR) über die Zeit. Schwarze Balken repräsentieren die Stemm- und weiße Balken die Schwingphasen beziehungsweise die Schrittreflexe.	74
5.18	Bodendetektion: a) Schematischer Aufbau des Tasters zur Bodendetektion mit Halterung (1), Taster (2), Feder (3) und Fuß (4). b) Referenzstromverbrauch der β -Gelenke für das linke Vorder- (VL), Mittel- (ML) und Hinterbein (HL) während der Absenkphase ohne Bodendetektion.	77
5.19	Testgelände für die Bodendetektion aus 10x10 cm Kanthölzern. Die Kanthölzer sind in Vierergruppen mit verschiedenen Höhen angeordnet.	79
5.20	Bodendetektion des rechten Vorderbeins mittels Stromverbrauch im β -Gelenk: Winkelwerte in Radiant und Stromverbrauch in % über die Zeit in [ms]. Aus der aktuellen Schwingphase berechneter Schwellwert für die Bodendetektion in Rot. Schwingphasen sind weiß und Stemmphasen hellgrau hinterlegt.	80

5.21	Schematische Darstellung der Stützpolygonveränderung. Roboter von oben mit Laufrichtung zum unteren Bildrand. Die Beine in der Schwingphase sind transparent und Beine in der Stemmphase schwarz dargestellt. Ein ausgefüllter roter Kreis markiert den Masseschwerpunkt der Maschine. Ein graues Dreieck repräsentiert das Stützpolygon. a) Bein vorne links tritt in eine Vertiefung. Schwarze Pfeile an den Beinen vorne rechts und in der Mitte links deuten die Verlängerung der Stemmphase an. b) Resultat der Stemmphasenverlängerung mit Änderung des Stützpolygons.	83
5.22	Schematische Darstellung der Suchphase für ein Bein. Ein schwarzer Pfeil markiert die Schwingphase. Ein blauer Pfeil deutet die Differenz zwischen AEP und maximaler Streckung an. Ein roter Pfeil repräsentiert das Suchen nach vorne. Ein grüner Pfeil gibt die anschließende Suche nach hinten an.	84
5.23	Suchreflex-Automat: Zustände geben stereotype Bewegungsabläufe aus. Zwei Eingaben: links Detektion maximaler Beinstreckung, rechts Detektion Bodenkontakt. Der Wert 1 entspricht einer Detektion.	85
5.24	Ergebnis Suchphasenexperiment: Winkelwerte der Gelenke α , β und γ und Stromverbrauch in % über die Zeit. Die Phase „Suche vorne“ ist violett und „Suche hinten“ blau hinterlegt. Die Startwinkel der Schwingphase sind: α : 0, 4; β : 1, 6; γ : 1, 6.	87
5.25	Schematische Darstellung des Levatorreflexes. Die Schwingphase von der PEP zu der AEP wird durch einen blauen Pfeil und die Reflexreaktion durch einen roten Pfeil markiert.	89
5.26	Schematische Darstellung des Levatorreflexes. Links: Bein stößt in der Schwingphase gegen ein Hindernis. Mitte: „Levation“ - Bein wird weiter angehoben und stößt erneut gegen das Hindernis. Rechts: „Extension“ - γ -Gelenk streckt das Bein vom Körper weg. Das Hindernis kann überwunden werden.	90
5.27	Levatorreflex als Moore-Automat mit drei Zuständen. Die Zustände geben als Ausgaben stereotype Bewegungsabläufe des Reflexes aus. Die Eingaben entsprechen der Hindernisdetektion und der Bodendetektion.	92
5.28	Testgelände zur Evaluation des Levatorreflexes mit der Startposition der Roboterplattform. Dieses Gelände unterscheidet sich von dem Testgelände für Bodendetektion durch eine andere Anordnung der Kanthölzer und einer größeren Zahl von Hindernissen.	93
5.29	Messdaten Levatorreflex. Für die Gelenke α , β und γ sind die Winkelwerte und der Stromverbrauch in % über die Zeit in Sekunden aufgetragen. Zusätzlich ist der Schwellwert für die Bodendetektion und für die Hindernisdetektion eingetragen. Violett: Levation; Blau: Extension.	94
5.30	Aktivität von Schwingphase und den einzelnen Reflexen. Oben: Winkelwerte für α , β und γ über die Zeit. Unten: Zeiträume, in denen die Schwingphase, die Bodendetektion, die Suchphase und der Levatorreflex aktiv sind bzw. auf Eingaben reagieren können.	97

5.31	Erweiterter Automat für die Beinsteuerung mit Schwingphase, Suchreflex, Levatorreflex und Stemmphase. Eingaben aus allen Einzelautomaten werden genutzt. Start und Stopp des Automaten durch externe Signale. . . .	98
5.32	Reflexkombination: Oben: Winkelwerte für α , β und γ und Stromverbrauch über die Zeit. Weiß: Schwingphase. Grau: Levatorreflex. Beige: Suchreflex.	99
6.1	Übersicht über die Klassifikationskriterien für Anomalien	105
6.2	Laufmaschine mit simulierter Amputation.	107
6.3	Roboterplattform mit amputiertem Bein	108
6.4	ORCA-Struktur mit Anpassung an einen Beinausfall	109
6.5	Schrittmusterdiagramm: Beinausfall zum Zeitpunkt 0. Die Stemmphasen sind in schwarz eingezeichnet. In Rot und Grün sind die Stemmphasen der intakten Nachbarbeine von dem Bein vorne Rechts (VR) eingezeichnet. Grau entspricht der zu erwartenden Stemmphase von Bein (VR).	111
6.6	Oben: Variationsmöglichkeiten für die Amputation von zwei Beinen. Unten: die maximalen Stützpolygone in Grau, die kritischen Stützpolygone in Rosa und der projizierte Masseschwerpunkt in Rot	114
6.7	Schrittmusterdiagramm: Erste Amputation bei Sekunde 0, zweite Amputation bei Sekunde 52	115
6.8	Modellierter Aufbau Testgelände. 160 cm breit und 230 cm tief; die rote Sphäre symbolisiert die Wärmequelle.	116
6.9	Lauftrajektorien der Roboterplattform ohne Amputation. Draufsicht auf das Testgelände (230 cm x 160 cm) mit Raute als Wärmequelle. Der Roboter wird durch einen Kreis und seine Orientierung durch einen Pfeil symbolisiert.	118
6.10	Lauftrajektorien der Roboterplattform mit Beinausfall links. Draufsicht auf das Testgelände (230x160 cm) mit Raute als Wärmequelle. Der Roboter wird durch einen Kreis und seine Orientierung durch einen Pfeil symbolisiert.	120
6.11	Lauftrajektorien der Roboterplattform mit Beinausfall rechts. Draufsicht auf das Testgelände (230x160 cm) mit Raute als Wärmequelle. Der Roboter wird durch einen Kreis und seine Orientierung durch einen Pfeil symbolisiert.	122
6.12	Schematische Darstellung für die Erweiterung der Koordinationsregel . .	124
6.13	Vergleich der Ergebnisse ohne und mit Eingriff einer OCU	126
A.1	Messwerte für den Schrittreflex von innen nach außen.	132
A.2	Winkel- und Stromwerte über die Zeit für ein β -Gelenk beim Lauf des Roboters im Testgelände aus Abschnitt 5.3.6.2.	133
A.3	Messwerte zeigen einen Suchreflex mit der Detektion des Bodenkontakts im Zustand „Suche vorne“.	134
A.4	Messwerte zeigen einen Suchreflex ohne Detektion des Bodenkontakts. .	135

Tabellenverzeichnis

4.1	Technische und geometrische Daten der OSCAR-Testplattform	39
6.1	Abhängigkeiten für den Eingriff in die Koordinationsregel: die Extrempositionen AEP und PEP für die Koordinationsregel hängen von den Nachbarbeinen $i - 1$ und $i + 1$ und ihrer Schwingrichtung, im oder gegen den Uhrzeigersinn (UZS), ab.	125

Literaturverzeichnis

- [1] Department, IFR S. (Hrsg.) ; IFR Statistical Department (Veranst.): *World Robotics*. <http://www.worldrobotics.org/>. Version: 2009
- [2] Abbott, Alison: Biological robotics: Working out the bugs. In: *Nature* 445 (2007), S. 250–253
- [3] Adria, Oliver ; Streich, Hermann ; Hertzberg, Joachim: Dynamic replanning in uncertain environments for a sewer inspection robot. In: *International Journal of Advanced Robotic Systems* (1) (2004), S. 33–38
- [4] Albiez, J. ; Dillmann, R.: Behaviour Networks for Walking Machines - A Design Method. In: *7th International Conference on Climbing and Walking Robots*, Springer Berlin Heidelberg, 2004, S. 349–356
- [5] AldebaranRobotics: *Aldebaran Robotics' NAO robot raises a Euro 5 million Series A financing round*. online. http://www.aldebaran-robotics.com/Press/CP_Janvier_08.pdf. Version: January 2008
- [6] Ammann, Nikolaus A.: *Physikalische 3D-Simulation eines hexapoden Roboters*, Institut für Technische Informatik Universität zu Lübeck, Bachelorarbeit, 2009
- [7] Brockmann, W. ; Maehle, E. ; Mösch, F.: Organic Fault-Tolerant Control Architecture for Robotic Applications. In: *4th IARP/IEEE-RAS/EURON Workshop on Dependable Robots in Human Environments*, Nagoya University/Japan, 2005, S. 16–18
- [8] Brockmann, W. ; Rosemann, N.: Instantaneous Anomaly Detection in Online Learning Fuzzy Systems. In: *3rd Int. Workshop on Genetic and Evolving Fuzzy Systems*, IEEE Press, April 2008, S. 23–28
- [9] Bässler, U. ; Büschges, A.: Pattern generation for stick insect walking movements - multisensory control of a locomotor program. In: *Brain Research Reviews* 27(1) (1998), S. 65–88
- [10] Buschmann, C. ; Hellbrück, H. ; Fischer, S. ; Kröller, A. ; Fekete, S.P.: Radio Propagation - Aware Distance Estimation Based on Neighborhood Comparison. In: *Proceedings of the 4th European Conference on Wireless Sensor Networks* Bd. 4373/2007, Springer Berlin / Heidelberg, 2007, S. 325–340
- [11] Camazine, Scott (Hrsg.) ; Deneubourg, Jean-Louis (Hrsg.) ; Franks, Nigel R. (Hrsg.) ; Sneyd, James (Hrsg.) ; Theraulaz, Guy (Hrsg.) ; Bonabeau, Eric (Hrsg.): *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton University Press, 2001

- [12] Campbell, Donald: *Bounding and Stair Descent in the Hexapod RHex*, McGill University, Montreal, Diplomarbeit, 2004
- [13] Chasserat, C. ; Clarac, F.: Interlimb coordination factors during driven walking in crustacea. A comparative study of absolute and relative coordination. In: *Journal of Comparative Physiology* 139 (1980), S. 293–306
- [14] Colombano, S. ; Kirchner, F. ; Spenneberg, D. ; Hanratty, J.: Exploration of Planetary Terrains with a Legged Robot as a Scout Adjunct to a Rover. In: *AIAA Space 2004 Conference and Exhibit*, 2004, 412-413
- [15] Cruse, H. ; Bartling, C.: Movement of joint angles in the legs of a walking insect, *carausius morosus*. In: *Journal of Insect Physiology* 41 (1995), S. 761–771
- [16] Cruse, H. ; Schmitz, J. ; Braun, U. ; Schwins, A.: Control of body height in a stick insect walking on a treadwheel. In: *Journal of Experimental Biology* 181 (1993), S. 141–155
- [17] Cruse, Holk: The control of body position in the stick insect *Carausius morosus*, when walking over uneven surfaces. In: *Biological Cybernetics* 24 (1976), S. 25–33
- [18] Cruse, Holk: The control of the anterior extreme position of the hind leg of a walking insect. (*Carausius morosus*). In: *Physiological Entomology* 4 (1979), S. 121–124
- [19] Cruse, Holk: A quantitative model of walking incorporating central and peripheral influences. In: *Biological Cybernetics* 39 (1990), S. 131–136
- [20] Cruse, Holk: What mechanisms coordinate leg movements in walking arthropods? In: *TINS* 13 (1990), S. 15–21
- [21] Cruse, Holk: The evolution of cognition - a hypothesis. In: *Cognitive Science* No. 27 (2003), S. 135–155
- [22] Cruse, Holk ; Kindermann, Thomas ; Schumm, Michael ; Dean, Jeffrey ; Schmitz, Josef: Walknet - a biologically inspired network to control six-legged walking. In: *Neural Networks* Volume 11, Issues 7-8 (1998), S. 1435–1447
- [23] Dean, J. ; Wendler, G.: Stick insect walking on a wheel: Perturbations induced by obstruction of leg protraction. In: *Journal of Comparative Physiology A* 148 (1982), S. 195–207
- [24] Deere, John: <http://www.deere.com/>. online. <http://www.deere.com/>
- [25] Dittrich, P.: Chemical Computing. In: *Proceedings of the International Workshop on Unconventional Programming Paradigms* Bd. LNCS 3566, Springer, Berlin, 2005, S. 19–32
- [26] Dürr, V. ; Authmann, T.: Insect curve walking revisited: Transitions versus steady states. In: *Zoology* 105 Supplement V (2002), S. 66

- [27] Dürr, Volker: Stereotypic leg searching-movements in the stick insect: Kinematic analysis, behavioural context and simulation. In: *Journal of Experimental Biology* 204 (2001), S. 1589–1604
- [28] Dürr, Volker ; Ebeling, Wiebke: The behavioural transition from straight to curve walking: kinetics of leg movement parameters and the initiation of turning. In: *The Journal of Experimental Biology* 208 (2005), S. 2237–2252
- [29] Dürr, Volker ; Krause, André ; Schmitz, Josef ; Cruse, Holk: Neuroethological concepts and their transfer to walking machines. In: *International Journal of Robotics Research* 22 (2003), S. 151–167
- [30] Dürr, Volker ; Schmitz, Josef ; Cruse, Holk: Behaviour-based modelling of hexapod locomotion: linking biology and technical application. In: *Arthropod Structure & Development* 33 (2004), S. 237–250
- [31] Dudek, Nico: *Adaptive Reflexbaiserte Kraftverteilung eines Hexapoden Roboters*, Institut für Technische Informatik, Universität zu Lübeck, Bachelorarbeit, 2008
- [32] Dzhantimirov ; Palis ; Schmucker ; Zavgorodniy ; Telesh: HIL/SIL by development of six-legged robot SLAIR 2. In: *10th International Conference on CLAWAR*, Singapore, July 2007, S. 16–18
- [33] Ebeling, Wiebke ; Dürr, Volker: Perturbation of leg protraction causes context-dependent modulation of inter-leg coordination, but not of avoidance reflexes. In: *The Journal of Experimental Biology* 209 (2006), S. 2199–2214
- [34] El Sayed Auf, A. ; Dudek, N. ; Maehle, E.: Hexapod Walking as Emergent Reaction to Externally Acting Forces. In: *Proceedings of Robotica 2009*, Portugal, 2009, S. 67–72
- [35] El Sayed Auf, A. ; Litza, M. ; Maehle, E.: Distributed Fault-Tolerant Robot Control Architecture Based on Organic Computing Principles. In: *Biologically-Inspired Collaborative Computing*, Springer, Boston, 2008, S. 115–124
- [36] El Sayed Auf, A. ; Mösch, F. ; Litza, M.: How the Six-Legged Walking Machine OSCAR Handles Leg Amputations. In: *From Animals to Animals 9 (Simulation of Adaptive Behaviour - SAB'09)*, 2006
- [37] El Sayed Auf, Adam ; Larionova, Svetlana ; Litza, Marek ; Mösch, Florian ; Jakimovski, Bojan ; Maehle, Erik: Ein Organic Computing Ansatz zur Steuerung einer sechsbeinigen Laufmaschine. In: *Autonome Mobile Systeme*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007, S. 233–239
- [38] Europe, Sony A.: <http://support.sony-europe.com/aibo/index.asp>. online. <http://support.sony-europe.com/aibo/index.asp>
- [39] Fekete, S.P. ; Fischer, S. ; Hellbrück, H. ; Hendriks, B. ; Wegener, A.: *AutoNomos: A Distributed and Self-Regulating Approach for Organizing a Large System of Mobile Objects*. <http://www.auto-nomos.de/>, . – DFG SPP 1183

- [40] Ferrell, C.: Robust Agent Control of an Autonomous Robot with Many Sensors and Actuators / MIT Artificial Intelligence Lab. 1993. – Forschungsbericht
- [41] Ferrell, C.: Failure Recognition and Fault Tolerance of an Autonomous Robot. In: *Adaptive Behavior* 2:4 (1994), S. 375–398
- [42] Ferrell, C.: A Comparison of Three Insect-Inspired Locomotion Controllers. In: *Robotics and Autonomous Systems* 16:2-4 (1995), S. 135–159
- [43] Fey, D. ; Gaede, C. ; Loos, A. ; Komann, M.: A New Marching Pixels Algorithm for Application-Specific Vision Chips for Fast Detection of Objects' Centroids. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems (PDCS)*, 2008
- [44] Fielding, M.R. ; Dunlop, R. ; Damaren, C.J.: Hamlet: Force/Position controlled Hexapod Walker-Design and Systems. In: *Proceedings IEEE International Conference on Control Applications*, 2001, S. 984–989
- [45] Gois, Jorge Audrin M.: *Sensor-based Collision Avoidance System for the Walking Machine ALDURO*, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2005
- [46] Graham, D.: The effect of amputation and leg restrain on the free walking coordination of the stick insect *Carausius mososus*. In: *Journal of Comparative Physiology A: Sensory, Neural, and Behavioural Physiology* 161 (1977), S. 91–116
- [47] Graham, D.: Pattern and control of walking insects. In: *Advances in Insect Physiology* 18 (1985), S. 31–140
- [48] Görner, M. ; Hirzinger, Gerd: Analysis and Evaluation of the Stability of a Biologically Inspired, Leg Loss Tolerant Gait for Six- and Eight-Legged Walking Robots. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010
- [49] Görner, M. ; Wimböck, T. ; Baumann, A. ; Fuchs, M. ; Bahls, T. ; Grebenstein, M. ; Borst, Ch. ; Butterfass, J. ; Hirzinger, G.: The DLR-Crawler: A Testbed for Actively Compliant Hexapod Walking Based on the Fingers of DLR-Hand II. In: *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008
- [50] Görner, M. ; Wimböck, T. ; Hirzinger, G.: The DLR Crawler: evaluation of gaits and control of an actively compliant six-legged walking robot. In: *Industrial Robot: An International Journal* 36 (2009), S. 344–351
- [51] Grosspietsch, Karl-Erwin: Adaptive Filters for the Dependable Control of Autonomous Robot Systems. In: *19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05) - Workshop* 16 17 (2005), S. 284b
- [52] Guddat, M. ; Frik, M.: Control of Walking Machines with Artificial Reflexes. In: *Advanced Motion of Animals and Machines, Second International Symposium on Impact and Friction of Solids, Structures and Intelligent Machines*, 2000

- [53] H, Rosano ; Webb, B.: A dynamic model of thoracic differentiation for the control of turning in the stick insect. In: *Biological Cybernetics* 97 (2007), S. 229–24
- [54] Haidacher, S. ; Butterfass, J. ; Fischer, M. ; Grebenstein, M. ; Joehl, K. ; Kunze, K. ; Nickl, M. ; Seitz, N. ; G.Hirzinger: DLR-Hand II: Hard- and Software Architecture for Information Processing. In: *Proceedings of the 2003 IEEE Conference on Robotics & Automation*, 2003, S. 684–689
- [55] Halme, A.J. ; Salmi, S. ; Leppänen, I.: Control and stabilisation of the semi-dynamical motion of a heavy six-legged walking machine. In: *8th International Conference on Advanced Robotics (ICAR'97)*, 1997, S. 44–47
- [56] Hartikainen, K.K. ; Halme, A.J. ; Lehtinen, H. ; Koskinen, K.O.: MECANT I: A six legged walking machine for research purposes in outdoor environment. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1992
- [57] Holst, E. v.: Über relative Koordination bei Arthropoden. In: *Pflügers Archiv - European Journal of Physiology* 246 (1943), S. 847–865
- [58] <http://code.google.com/p/jmepphysics/>: *jMonkey Enginge Physics*. Online. <http://code.google.com/p/jmepphysics/>
- [59] <http://ode.org/>: *Open Dynamics Engine*. Online. <http://ode.org/>
- [60] <https://www.rtai.org/>: *RTAI API Documentation*. online. <https://www.rtai.org/>
- [61] <http://www.jmonkeyengine.com>: *jMonkey Engine*. Online. <http://www.jmonkeyengine.com>
- [62] Huebscher, Markus C. ; McCann, Julie A.: A survey of Autonomic Computing-Degrees, Models, and Applications. In: *ACM Computing Surveys* 40 (2008), S. 7:1–7:28
- [63] Ihme, Thomas: *Steuerung von sechsbeinigen Laufrobotern unter dem Aspekt technischer Anwendugnen*, Fakultät für Informatik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Diss., 2002
- [64] International Federation of Robotics: <http://www.ifr.org/>. online. <http://www.ifr.org/>
- [65] Jakimovski, B. ; Litza, M. ; Mösch, F. ; El Sayed Auf, A.: Development of an Organic Computing Architecture for Robot Control. In: *Lecture Notes in Informatics (LNI) - Proceedings*, Köllen Druck+Verlag GmbH, Bonn 2006, S. 145–152
- [66] Jakimovski, B. ; Maehle, E.: Artificial Immune System Based Robot Anomaly Detection Engine for Fault Tolerant Robots. In: *5th International Conference on Autonomic and Trusted Computing (ATC-08)*, 2008
- [67] Jakimovski, B. ; Maehle, E.: Self-reconfiguring hexapod robot OSCAR using organically inspired approaches and innovative robot leg amputation mechanism. In: *International Conference on Automation, Robotics and Control Systems, ARCS-09*, 2009

- [68] Jakimovski, B. ; Maehle, E.: In situ self-reconfiguration of hexapod robot OSCAR using biologically inspired approaches. In: *Climbing and Walking Robots by Behnam Miripour (Ed.), INTECH*, 2010
- [69] Jakimovski, B. ; Meyer, B. ; Maehle, E.: Swarm Intelligence for Self-Reconfiguring Walking Robot. In: *Swarm Intelligence Symposium, SIS 2008. IEEE*, 2008
- [70] Jakimovski, B. ; Meyer, B. ; Maehle, E.: Firefly flashing synchronization as inspiration for self-synchronization of walking robot gait patterns using a decentralized robot control architecture. In: *Architecture of Computing Systems - ARCS 2010*, 2010
- [71] JARA: www.jara.jp/e/. Online. <http://www.jara.jp/e/>
- [72] JogAmp.org: <http://jogamp.org/>. online,
- [73] Kerscher, T. ; Roennau, A. ; Ziegenmeyer, M. ; Gassmann, B. ; Zoellner, J.M. ; Dillmann, R.: Behaviour-based control of a six-legged walking machine LAURON IVc. In: *11th International Conference on Climbing and Walking Robots*, 2008
- [74] Kindermann, T.: Behavior and adaptability of a six-legged walking system with highly distributed control. In: *Adaptive Behavior 9* (2002), S. 16–41
- [75] Kingsley, D. A. ; Quinn, R. D. ; Ritzmann, R. E.: Cockroach inspired robot with artificial muscles. In: *Proceedings International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2003)*, 2003
- [76] Konyev, M. ; Palis, F. ; Zavgorodniy, Y. ; Melnikov, A. ; Rudskiy, A. ; Telesh, A.: Walking robot ANTON: Design, simulation, experiments. In: *Proceedings of CLAWAR 2008, 11th International Conference on Climbing and Walking Robots*, 2008
- [77] Krause, Andre F. ; Dürr, Volker: Tactile efficiency of insect antennae with two hinge joints. In: *Biological Cybernetics 91* (2004), S. 168–181
- [78] Larionova, Svetlana ; Jakimovski, Bojan ; El Sayed Auf, Adam ; Litza, Marek ; Moesch, Florian ; Maehle, Erik ; Brockmann, Werner: Toward a Fault Tolerant Mobile Robot: Mutual Information for Monitoring of the Robot Health Status. In: *Int. Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments, IARP, EURON, IEEE/RAS*, 2007
- [79] Larionova, Svetlana ; Marques, Lino ; Almeida, Anibal T.: Features Selection for Sensor Fusion in a Demining Robot. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005
- [80] Lembke, Stefan: *Integration und Evaluation von Reflexen in die Laufsteuerung eines hexapoden Roboters.* – Studienarbeit am Institut für Technische Informatik der Universität zu Lübeck
- [81] Lethinen, Hannu: *Force based motion control of a walking machine*, VTT Technical Research Centre of Finland, Diss., 1994

- [82] Library, Open G.: <http://www.opengl.org/>. online. OpenGraphicsLibrary
- [83] Manoonpong, P. ; Pasemann, F. ; Wörgötter, F.: Sensor-driven neural control for omnidirectional locomotion and versatile reactive behaviors of walking machines. In: *Robotics and Autonomous Systems* 56 (2007), S. 265–288
- [84] Manoonpong, P. ; Woergoetter, F.: Neural control for locomotion of walking machines. In: *Proceedings of 4th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2008)*, 2008
- [85] MIT: *MIT Leg Laboratory*. <http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/robots.html>,
- [86] Müller-Schloer, C. ; Malsburg, C. von d. ; Würtz, R.P.: Organic Computing - Aktuelles Schlagwort. In: *Informatik Spektrum* 27 (2004), S. 332–336
- [87] Mösch, F. ; Litza, M. ; El Sayed Auf, A. ; Jakimovski, B. ; Maehle, E. ; Brockmann, W.: Organic Fault-Tolerant Controller for the Walking Robot OSCAR. In: *Proc. of the Workshop on „Dependability and Fault Tolerance“ at ARCS, 2007*
- [88] Mösch, F. ; Litza, M. ; El Sayed Auf, A. ; Maehle, E. ; Großpietsch, K.-E. ; Brockmann, W.: ORCA - Towards an Organic Robotic Control. In: *Self-Organizing Systems, 1st International Workshop (IWSOS 2006) and 3rd International Workshop on New Trends in Network Architectures and Services (EuroNGI 2006) Proceedings, LNCS 4124, ISSN, 2006*
- [89] OpenServo.org: *OpenServo Homepage*. Online. <http://www.openservo.com/>
- [90] Palis, Frank ; Konyev, Mykhaylo ; Rusin, Vadym ; Zavorodniy, Yuriy: Control System of Six Legged Autonomous Intelligent Robot. In: *7th Conference on Mobile Robots and Competitions-ROBOTICA, 2001*
- [91] Pearson, K. G. ; Franklin, R.: Characteristics of leg movements and patterns of coordination in locusts walking on rough terrain. In: *International Journal of Robotics Research* 3 (1984), S. 101–112
- [92] *Kapitel 12*. In: Pfeiffer (Hrsg.) ; Cruse (Hrsg.): *Autonomes Laufen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, S. 191–200
- [93] Pfeiffer, Friedrich: The TUM walking machines. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society* 365 (2006), S. 109–131
- [94] Pringle, J. W. S.: The Reflex Mechanism of the Insect Leg. In: *Journal of Experimental Biology* 17 (1940), S. 8–17
- [95] R. Altendorfer, et. a.: RHex: A Biologically Inspired Hexapod Runner. In: *Autonomous Robots* 11 (2001), S. 207–213
- [96] Raibert, Marc ; Blankespoor, Kevin ; Nelson, Gabriel ; Playter, Rob: BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot. In: *Proceedings of the 17th World Congress, 2008*

- [97] RoboCupRescue.org: *Robocup Rescue Homepage*. Online. <http://www.robocuprescue.org/>
- [98] Robotics, World: <http://www.worldrobotics.org/>. online. <http://www.worldrobotics.org/>
- [99] Rome, Erich ; Hertzberg, Joachim ; Kirchner, Frank ; Christaller, Thomas: Towards autonomous sewer robots: the MAKRO project. In: *Urban Water* Volume 1, Issue 1 (1999), S. 57–70
- [100] Rosemann, N. ; Brockmann, W.: Concept for Controlled Self-optimization in Online Learning Neuro-fuzzy Systems. In: *Advances in Artificial Intelligence, LNCS*, 2007
- [101] Rosheim, M. E.: *Robot Evolution: The Development of Anthrobotics*. John Wiles & Sons, 1994
- [102] Rosheim, Mark (Hrsg.): *Leonardo's Lost Robots*. Springer-Verlag Berlin Hiedelberg, 2006
- [103] Salzmann, J. ; Behnke, R. ; Timmermann, D.: A Self-Organized Localization-Free Clustering Approach for Redundancy Exploitation in Large Wireless Sensor Networks. In: *Tagungsband der GI-Jahrestagung (Informatik) September 2008* (2008), S. 747–754
- [104] Santos, P. G. ; Garcia, E. ; Estremera, J. ; Armada, M.A.: DYLEMA: Using walking robots for landmine detection and location. In: *International Journal of Systems Science* 36 (2005), S. 545–558
- [105] Schilling, M. ; Cruse, H. ; Arena, P.: Hexapod walking: an expansion to walknet dealing with leg amputations and force oscillations. In: *Biological Cybernetics* 96(3) (2007), S. 323–340
- [106] Schilling, Malte ; Schneider, Axel ; Cruse, Holk ; Schmitz, Josef: Local control mechanisms in six-legged walking. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008
- [107] Schmeck, Hartmut: *Organic Computing. DFG Schwerpunktprogramm 1183*. <http://www.organic-computing.de/spp>, 2005-2011
- [108] Schmitz, J. ; Haßfeld, G.: The treading-on-tarsus reflex in stick insects: Phase-dependence and modifications of the motor output during walking. In: *The Journal of Experimental Biology* 143 (1989), S. 373–388
- [109] Schmitz, J. ; Schneider, A. ; Schilling, M. ; Cruse, H.: No need for a body model: Positive velocity feedback for the control of an 18-dof robot walker. In: *Applied Bionics and Biomechanics, Special Issue on Biologically Inspired Robots* 5 (2008), S. 135–147
- [110] Schmitz, Josef ; Dean, Jeffrey ; Kindermann, Thomas ; Schumm, Michael ; Cruse, Holk: A Biologically Inspired Controller for Hexapod Walking: Simple Solutions by Exploiting Physical Properties. In: *The Biological Bulletin* 200 (2001), S. 195–200

- [111] Schmucker, U.: Der sechsbeinige Schreitroboter Katharina. In: *Spektrum der Wissenschaft. Dossier* 1998,4 (1998), S. 44–47
- [112] Schmucker, U. ; Schneider, A. ; Ihme, T.: Sechsbeiniger Schreitroboter mit Krafterückführung - Konzeption und erste Ergebnisse. In: *1. Brandenburger Workshop Mechatronik*, 1994
- [113] Schmucker, U. ; Schneider, A. ; Rusin, V.: Interactive virtual simulator (IVS) of six-legged robot 'Katharina'. In: *Sixth International Conference on Climbing and Walking Robots and Their Supporting Technologies, CLAWAR 2003*, 2003, S. 327–332
- [114] Schneider, Axel ; Cruse, Holk ; Schmitz, Josef: Decentralized Control of Elastic Limbs in Closed Kinematic Chains. In: *The International Journal of Robotics Research* 25 (2006), S. 913–930
- [115] Scholl, K.-U. ; Albiez, J. ; Gassmann, B.: MCA-An Expandable Modular Controller Architecture. In: *Proceeding, 3rd Real-Time Linux Workshop, 2001*, 2001
- [116] Steingrube, Silke ; Timme, Marc ; Wörgötter, Florentin ; Manoonpong, Poramate: Self-organized adaptation of a simple neural circuit enables complex robot behaviour. In: *Nature Physics* 6 (2010), S. 224–230
- [117] Tryba, A. K. ; Ritzmann, R. E.: Multi-joint coordination during walking and foothold searching in the Blaberus cockroach I. Kinematics and electromyograms. In: *Journal of Neurophysiology* 83 (2002), S. 3323–3336
- [118] Tryba, A. K. ; Ritzmann, R. E.: Multi-joint coordination during walking and foothold searching in the Blaberus cockroach II. Extensor motor pattern. In: *Journal of Neurophysiology* 83 (2002), S. 3337–3350
- [119] Uhl, K. ; Ziegenmeyer, M.: MCA2 - An Extensible Modular Framework for Robot Control Applications. In: *Proceedings of CLAWAR 2007, 10th International Conference on Climbing and Walking Robots, 2007*
- [120] Watson, J. T. ; Ritzmann, R. E. ; Zill, S. N. ; Pollack, A. J.: Control of obstacle climbing in the cockroach *Blaberus discoidalis* I: Kinematics. In: *Journal of Comparative Physiology A* 188 (2002), S. 39–53
- [121] Watson, J. T. ; Ritzmann, R. E. ; Zill, S. N. ; Pollack, A. J.: Control of obstacle climbing in the cockroach *Blaberus discoidalis* II: Motor activities associated with joint movement. In: *Journal of Comparative Physiology A* 188 (2002), S. 55–69
- [122] Wendler, G.: Laufen und Stehen der Stabheuschrecke *Carausius morosus*: Sinnesborstfelder in den Beingelenken von Regelkreisen. In: *Zeitschrift für vergleichende Physiologie* 391 (1964), S. 892–896
- [123] WowWee: <http://www.wowwee.com/>. online. <http://www.wowwee.com/>
- [124] Ziegenmeyer, M. ; Rönnau, A. ; Kerscher, T. ; Zöllner, J. M. ; Dillmann, R.: Die sechsbeinige Laufmaschine LAURON IVc. In: *Autonome Mobile Systeme 2009*, 2009

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Adam-Pharaoun El Sayed Auf
Geburtsdatum	27. Juli 1979
Geburtsort	Fontenay-sous-Bois (Frankreich)
Nationalität	deutsch
Familienstand	ledig, keine Kinder

Schulbildung und Studium

09/1986 – 06/1990	Grundschule, Lüdenscheid
07/1990 – 06/2000	Bergstadt-Gymnasium Lüdenscheid Abschluss: Abitur
09/2000 – 06/2001	Grundwehrdienst: 3. Panzergrenadierbataillon 342, Koblenz
10/2001 – 11/2005	Universität Bielefeld Studienfach: Naturwissenschaftliche Informatik Hauptfächer: Informatik und Biologie Diplom der Informatik an der Universität Bielefeld Diplomarbeit am Institut für Biologische Kybernetik: Bewegungsanalyse und Simulation von Sechsbeinern in schwierigen Laufsituationen

Beruflicher Werdegang

seit 01. Januar 2006	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische Informatik, Universität zu Lübeck
----------------------	---

Eigene Publikationen

- Laika, A.; Paul, C.; Stechele, W.; El Sayed Auf, A.; Maehle, E.: FPGA-based Real-time Moving Object Detection for Walking Robots. 8th IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, SSRR 2010, Bremen, Germany 2010
- El Sayed Auf, A.; Dudek, N.; Maehle, E.: Hexapod Walking as Emergent Reaction to Externally Acting Forces. Proceedings of Robotica 2009, 67-72, Proceedings Robotica 2009, Portugal 2009
- El Sayed Auf, A.; Litza, M.; Maehle, E.: Distributed Fault-Tolerant Robot Control Architecture Based on Organic Computing Principles. Biologically-Inspired Collaborative Computing, 115-124, Springer, Boston 2008
- El Sayed Auf, A.; Larionova, S.; Litza, M.; Mösch, F.; Jakimovski, B.; Maehle, E.: Ein Organic Computing Ansatz zur Steuerung einer sechsbeinigen Laufmaschine. AMS, 233-239, Springer-Verlag, Berlin / Heidelberg 2007
- Larionova, S.; Jakimovski, B.; El Sayed Auf, A.; Litza, M.; Mösch, F.; Maehle, E.; Brockmann, W.: Toward a Fault Tolerant Mobile Robot: Mutual Information for Monitoring of the Robot Health Status. Int. Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments, IARP, EURON, IEEE/RAS, Rom, Italien 2007
- Mösch, F.; Litza, M.; El Sayed Auf, A.; Jakimovski, B.; Maehle, E.; Brockmann, W.: Organic Fault-Tolerant Controller for the Walking Robot OSCAR. Proceedings of the Workshop on „Dependability and Fault Tolerance“ at ARCS, VDI, 2007
- El Sayed Auf, A.; Mösch, F.; Litza, M.: How the Six-Legged Walking Machine OSCAR Handles Leg Amputations. From Animals to Animals 9 (Simulation of Adaptive Behaviour - SAB'09), Rom, Italien 2006
- Jakimovski, B.; Litza, M.; Mösch, F.; El Sayed Auf, A.: Development of an Organic Computing Architecture for Robot Control. Lecture Notes in Informatics (LNI) - Proceedings, 145-152, Köllen Druck+Verlag GmbH, Bonn 2006
- Mösch, F.; Litza, M.; El Sayed Auf, A.; Maehle, E.; Großpietsch, K.-E.; Brockmann, W.: ORCA - Towards an Organic Robotic Control. Self-Organizing Systems, 1st International Workshop (IWSOS 2006) and 3rd International Workshop on New Trends in Network Architectures and Services (EuroNGI 2006) Proceedings, LNCS 4124, 251-253, Springer, Berlin / Heidelberg 2006