

Modellbasierter Entwurf und Optimierung mehrbeiniger Laufroboter

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der KIT-Fakultät für Informatik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Arne Rönnau

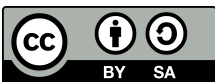
aus El Paso, TX, USA

Tag der mündlichen Prüfung: 16.07.2019

Erster Referent: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann

Zweiter Referent: Prof. Dr. rer. nat. Karsten Berns

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie
Fakultät für Informatik, 2019
Referenten: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann
Prof. Dr. rer. nat. Karsten Berns



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung -
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 9 |
| 1.1 | Mehrbeiniges Laufen | 9 |
| 1.2 | Ziel der Arbeit | 10 |
| 1.3 | Einordnung und Beitrag der Arbeit | 11 |
| 1.4 | Gliederung der Arbeit | 15 |
| 2 | Mehrbeiniges Laufen in der Natur | 17 |
| 2.1 | Taxonomie terrestrischer Lokomotionsarten | 17 |
| 2.2 | Taxonomie des mehrbeinigen Laufens anhand der Kinematik | 18 |
| 2.3 | Taxonomie des mehrbeinigen Laufens anhand der Stabilität | 19 |
| 2.4 | Grundlagen des mehrbeinigen Laufens | 20 |
| 2.5 | Skalierungseffekte in der Natur | 27 |
| 3 | Stand der Forschung im Bereich mehrbeiniger Laufroboter | 33 |
| 3.1 | Frühe Laufroboter | 33 |
| 3.2 | Vielfalt moderner Laufroboter | 34 |
| 3.3 | Kinematische Optimierung mehrbeiniger Laufroboter aus der Literatur | 35 |
| 3.4 | Stabilitätsbasierte Optimierung mehrbeiniger Laufroboter aus der Literatur | 42 |
| 3.5 | Energetische Optimierung mehrbeiniger Laufroboter aus der Literatur | 44 |
| 3.6 | Laufroboter LAURON | 49 |
| 3.7 | Bewertung potentieller Laufroboter-Anwendungen | 53 |
| 3.8 | Diskussion zum Stand der Forschung | 54 |
| 4 | Modellbasierte Metriken für den Entwurf und die Optimierung | 57 |
| 4.1 | Motivation und Herausforderungen | 57 |
| 4.2 | Bekannte Metriken in der Forschung | 61 |
| 4.2.1 | Stabilitätsmetriken | 61 |
| 4.2.2 | Statische Stabilitätskriterien | 62 |
| 4.2.3 | Dynamische Stabilitätskriterien | 65 |
| 4.2.4 | Geschwindigkeitsmetriken | 74 |
| 4.2.5 | Energieeffizienzmetriken | 77 |
| 4.2.6 | Diskussion Metriken aus der Literatur | 88 |
| 4.3 | Abstraktion und Modellbildung | 94 |
| 4.3.1 | Modellkenngrößen | 94 |
| 4.4 | Entwicklung des abstrakten, mehrbeinigen Lokomotionsmodells | 98 |
| 4.5 | Modellbasierte Metriken für Laufroboter | 100 |
| 4.5.1 | Modellbasierte, normierte Stabilitätsmetrik | 100 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.5.2 | Modellbasierte, normierte Geschwindigkeitsmetrik | 103 |
| 4.5.3 | Modellbasierte, normierte Energieeffizienzmetrik | 105 |
| 4.6 | Zusammenfassung und Diskussion | 107 |
| 5 | Analyse der mehrbeinigen Lokomotion | 109 |
| 5.1 | Empirische Analysen | 109 |
| 5.1.1 | Fußpunkte: AEP und PEP | 110 |
| 5.1.2 | Energieverbrauch bzw. Leistungsaufnahme | 111 |
| 5.1.3 | Schwerpunkt | 112 |
| 5.1.4 | Laufgeschwindigkeit | 113 |
| 5.1.5 | Externe und interne Kräfte | 113 |
| 5.2 | Kinematische Analysen | 114 |
| 5.2.1 | Erreichbarkeits- und Arbeitsraumanalysen | 115 |
| 5.2.2 | Geschwindigkeitspotentiale im Arbeitsraum | 118 |
| 5.2.3 | Interaktive Bewegungstrajektorien | 121 |
| 5.3 | Dynamische Analysewerkzeuge | 124 |
| 5.3.1 | Dynamik Simulation für mehrbeinige Laufroboter | 124 |
| 5.3.2 | Integrierte Online-Simulation | 131 |
| 5.4 | Diskussion | 132 |
| 6 | Optimierung von mehrbeinigen Laufvorgängen | 135 |
| 6.1 | Optimierung der Stabilität | 135 |
| 6.1.1 | Kinematische Optimierung der Stabilität | 136 |
| 6.1.2 | Optimierung der Lokomotion zur Steigerung der Stabilität | 138 |
| 6.2 | Optimierung der Geschwindigkeit | 143 |
| 6.2.1 | Kinematische Optimierung der Geschwindigkeit | 143 |
| 6.2.2 | Optimierung der Lokomotion zur Steigerung der Geschwindigkeit | 146 |
| 6.3 | Optimierung der Energieeffizienz | 150 |
| 6.3.1 | Kinematische Optimierung der Energieeffizienz | 151 |
| 6.3.2 | Optimierung der Lokomotion zur Minimierung des Energieverbrauchs | 155 |
| 6.4 | Diskussion | 161 |
| 7 | Evaluation anhand der Roboter LAURON IVc und LAURON V | 165 |
| 7.1 | Evaluation der Analysemethoden | 165 |
| 7.2 | Evaluation der Optimierungsverfahren | 171 |
| 7.3 | Diskussion | 175 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 179 |
| 8.1 | Zusammenfassung | 179 |
| 8.2 | Ausblick | 183 |
| A | Mehrbeiniges Laufen in der technischen Umsetzung | 185 |
| A.1 | Historische Ansätze zur Realisierung des technischen Laufens | 185 |
| A.2 | Ausgewählte, moderne Laufroboter | 193 |

A.3 Anwendungen des technischen Laufens 206

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Dissertationsschrift mit dem Titel *Modellbasierter Entwurf und Optimierung mehrbeiniger Laufroboter* selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) beachtet haben.

Karlsruhe,
im Mai 2019

Arne Rönnau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Glossar

AEP Anterior Extreme Position: vorderster Fußpunkt zu Beginn der Stemmphase.

Aufstandsfläche Fläche, die von den Beinen mit Bodenkontakt aufgespannt wird.

Belastungsfaktor Dutyfactor: Zeitlicher Anteil der Stemmphase an der Gesamtzykluszeit.

Bodenkontaktkraft Gegenkraft des Untergrunds, die auf den Fuß wirkt während der Stemmphase.

bullet Physik-Engine zur dynamischen Simulation von Festkörpern.

CoT Cost of Transport: Lokomotionskosten als Energieeffizienzmetrik für Laufroboter.

CPG Central Pattern Generator: Zentraler Mustergenerator.

CpS Cost per Step: neu entwickelte, modellbasierte Energieeffizienzmetrik.

DFSM Distance Force Stability Measure: neu entwickelte, modellbasierte Stabilitätsmetrik.

DOF Degrees of Freedom: Freiheitsgrade/Gelenke eines Roboters.

DSM Dynamic Stability Margin: Dynamische Stabilitätsmetrik für Laufroboter.

Dutyfactor Belastungsfaktor: zeitlicher Anteil der Stemmphase an der Gesamtzykluszeit.

ESM Energie Stability Margin: Energiebasierte Stabilitätsmetrik für Laufroboter.

FASM Force Angle Stability Measure: Kraft-Winkel-basierte Stabilitätsmetrik für Roboter.

Froude Number Methode aus der Biologie zur Modellierung von Lokomotionsähnlichkeiten.

Gait Diagram Laufmuster-Diagramm: visuelle Darstellungsmethode für mehrbeinige Laufmuster.

Gesamtzykluszeit Zykluszeit: Gesamtzeit der Schwing- und Stemmphase.

Hexapod Sechsbeiniger Laufroboter.

Kenngrößen In dieser Arbeit: Wichtige Eigenschaften eines Roboters, die diesen charakterisieren.

Kinematik Geometrischen Zusammenhang zwischen Gelenken und Segmenten eines Roboters.

Laufmuster Wiederkehrende Reihenfolge, in der die Beine beim Laufen schwingen.

Laufmuster-Diagramm Gait Diagram: visuelle Darstellungsmethode für mehrbeinige Laufmuster.

- LAURON** Sechsbeiniger Laufroboter des FZI Forschungszentrum Informatik.
- Lokomotionsmodell** System um mathematisch das mehrbeinige Laufen zu beschreiben.
- Lokomotionsparameter** In dieser Arbeit: Schrittweite, Zykluszeit, Laufmuster, Geschwindigkeit, etc..
- MCoT** Mechanical Cost of Transport: Mechanische Transportkosten als Energieeffizienzmetrik.
- Mehrbeinige Lokomotion** In dieser Arbeit: Laufen mit mehr als vier Beinen.
- Metabolic Cost of Transport** Metabolische Lokomotionskosten: Energieeffizienzmetrik für Lebewesen.
- Metrik** Methode zur objektiven, quantitativen Bewertung einer Funktion.
- Morphologie** Äußere Gestalt von Lebewesen und Organismen - ähnlich dem Begriff Kinematik.
- NDESM** Normalized Dynamic Energy Stability Margin: Normalisierte Stabilitätsmetrik für Laufroboter.
- NWV** Normalised Walking Velocity: neu entwickelte, modellbasierte Geschwindigkeitsmetrik.
- ODE** Physik-Engine zur dynamischen Simulation von Festkörpern.
- Pentapod** Spezielles Laufmuster beim sechsbeinigen Laufen - jeweils 5 Beine bleiben auf dem Boden.
- PEP** Posterior Extreme Position: hinterster Fußpunkt am Ende der Stemmphase.
- Phasenverschiebung** Zeitlicher Versatz der Bewegungen zwischen den verschiedenen Beinen.
- PhysX** Physik-Engine zur dynamischen Simulation von Festkörpern.
- Quadruped** Vierbeiniger Laufroboter.
- Reflex** In dieser Arbeit: spontane Reaktion eines Lebewesens/Roboters auf einen Reiz.
- RoaDS** Robot and Dynamics Simulation: neu entwickelte Simulationsumgebung für Laufroboter.
- Schritthöhe** Maximale Höhe, die der Fuß während der Schwingbewegung erreicht.
- Schrittweite** Strecke die der Fuß innerhalb einer Schwingbewegung zurücklegt.
- Schwingphase** Teil der Laufbewegung: Fuß befindet sich in der Luft.
- Specific Resistance** Widerstand bei der Fortbewegung: Energieeffizienzmetrik für Roboter.
- SSM** Static Stability Margin: Statische Stabilitätsmetrik für Laufroboter.
- Stability Margin** Stabilitätsrand: Abstand bis zur kritischen Stelle, an der der Roboter umkippt.
- Stemmphase** Teil der Laufbewegung: Fuß befindet auf dem Boden.
- Taxonomie** Systematik zur Einordnung in Kategorien oder Klassen.

TCoT Total Cost of Transport: Gesamt-Transportkosten als Energieeffizienzmetrik für Laufroboter.

Tetrapod Spezielles Laufmuster beim sechsbeinigen Laufen - jeweils 4 Beine bleiben auf dem Boden.

Trajektorie Zeitliche Abfolge von Gelenkwinkeln oder kartesischen Koordinaten.

Tripod Spezielles Laufmuster beim sechsbeinigen Laufen - jeweils 3 Beine bleiben auf dem Boden.

TSM Tumble Stability Margin: Sturzbasierte Stabilitätsmetrik für Laufroboter.

Verhalten In dieser Arbeit: Gezielte Handlung oder Reaktion eines Roboters.

ZMP Zero Moment Point: Null-Momenten-Punkt als Stabilitätsmetrik für Laufroboter.

Zykluszeit Gesamtzeit der Schwing- + Stemmphase.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Abteilungsleiter der Abteilung Interaktive Diagnose und Servicesysteme (IDS) am FZI Forschungszentrum Informatik in Karlsruhe. Ohne die Unterstützung so vieler Personen in meinem Umfeld wäre es mir nicht möglich gewesen, diese Arbeit erfolgreich abzuschließen. All diesen Personen gilt mein Dank. Stellvertretend möchte ich einigen besonders danken:

Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann danke ich für das fortwährende Interesse an meiner Arbeit, den Diskussionen sowie Anregungen, aber natürlich auch für die Übernahme des Hauptreferats und das detaillierte Feedback zu meiner schriftlichen Ausarbeitung.

Weiterhin möchte ich Prof. rer. nat. Karsten Berns von der Technischen Universität Kaiserslautern für die Übernahme des Korreferates danken. Seine Expertise im Bereich mehrbeiniger Laufroboter wusste ich in den Diskussionen zu meiner Arbeit stets zu schätzen. Vielen Dank auch für die konstruktiven, detaillierten Anmerkungen zu der Arbeit.

Aber auch dem Vorstand des FZI sowie Herrn Prof. Dillmann möchte ich für das Vertrauen und die Möglichkeit danken im Sommer 2018 für mehrere Wochen in Pisa, Italien und danach in Odense, Dänemark zu forschen. Die Möglichkeit mich einige Wochen auf die Dissertation zu konzentrieren, sowie der Austausch mit den Kollegen in den hervorragenden Forschungsgruppen vor Ort wurde zu einem wichtigen Teil der Arbeit.

In diesem Zusammenhang möchte ich mich auch bei Prof. Cecilia Laschi und Prof. Egidio Falotico bedanken, die es mir trotz größter Platzprobleme ermöglicht haben, einen wunderbaren Arbeitsplatz am *Bio-Robotics Institute* an der *Sant'Anna School of Advanced Studies* zu finden. Grazie! Außerdem möchte ich Kurt Nielsen für das Vertrauen danken nachts alleine im Danish Technological Institute (DTI) zu forschen und meine Arbeit voran zu bringen. Ebenso möchte ich Xaver Kroischke für spannenden Gespräche und die Unterstützung bei zahlreichen organisatorischen sowie logistischen Problemen in Odense danken. Tak!

Weiter möchte ich allen aktiven und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen in der Abteilung IDS für die stets positive, offene Arbeitsatmosphäre und Diskussionsbereitschaft zu LAURON-Themen danken. Ein Dank gilt an dieser Stelle Thilo Kerscher, der mich die ersten Jahre am FZI in die Geheimnisse der Laufroboter-Entwicklung eingeweiht hat und viele Anregungen für die Themen dieser Arbeit lieferte.

Über die Jahre hinweg haben mich viele Studentinnen und Studenten bei meiner Forschung unterstützt und begleitet. Viele von ihnen teilten meine Begeisterung für LAURON und haben über Abschlussarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte Beiträge zu der Weiterentwicklung und Evaluation der Konzepte geleistet. Mein besonderer Dank gilt Timothee Büttner, Christian Billet, David Hellmeister, Georg Heppner, Roman Huber, Nicolas Hügel, Roman Katchan, Kai Hennig Koch, Dong-Uck Kong, Michael Nowicki, Stefan Scherzinger und Florian Sutter! Ich freue mich sehr, dass Georg, Stefan und Timothee schließlich auch Kollegen am FZI wurden. Besonders möchte ich meinem norddeutschen Kollegen und Freund Georg für seinen unermüdlichen Einsatz, den Glauben, dass Laufroboter die Welt besser machen können, die endlosen Wiederworte und ewig langen, aber konstruktiven Diskussionen danken, die wesentlich zu der Qualität dieser Arbeit beigetragen haben!

Ganz besonders möchte ich meiner lieben Frau Nadine danken. Ohne ihren jahrelangen Beistand sowie selbstverständliche Unterstützung mit nach Pisa und Odense zu kommen und ihre Nachsicht für die vielen Abenden und Wochenenden, die ich nicht zu Hause war, hätte ich diese Arbeit nicht abschließen können. Danke Schatz!

Mein größter Dank gilt meinen Töchtern Lara und Ella, die obwohl sie in der letzten Zeit so oft auf mich verzichten mussten, eine unendliche Begeisterung für meine Forschung aufbringen können. Ihre neugierige, faszinierte und stets fröhliche Art Robotern wie LAURON zu begegnen, hat mich auch in schwierigen Zeiten wieder aufgemuntert zugleich stark motiviert weiter zu machen. Danke!

Karlsruhe, im Mai 2019

Arne Rönna

1. Einleitung

Das Laufen ist eine natürliche, scheinbar einfache Art der Fortbewegung, die von vielen Lebewesen mühelos beherrscht wird. Neben dem Schwimmen und Fliegen ist das Laufen die wichtigste Lokomotionsart in der Natur. Sonderformen dieser Lokomotion wie z.B. das Kriechen oder Hüpfen spielen nur eine untergeordnete Rolle. Zahlentechnisch dominiert vor allem das mehrbeinige Laufen mit vier und sechs Beinen. Im Kontrast dazu bewegen sich technische, vom Menschen erschaffene Systeme meist mit Rädern fort. Laufen ist im Detail betrachtet ein sehr komplexer Vorgang und deshalb technisch nicht einfach umzusetzen. Dieser scheinbare Widerspruch einer so selbstverständlichen Fähigkeit und der doch hohen Komplexität fasziniert die Menschheit schon seit Jahrtausenden. Selbst heute birgt das Laufen noch immer viele wissenschaftliche sowie technische Herausforderungen. Diese Arbeit bietet eine Grundlage dafür das natürliche sowie technische Laufen besser zu verstehen. Weiter trägt sie dazu bei, die Laufleistung verschiedener Roboter vergleichen und zielgerichtet optimieren zu können. Roboterunabhängige Analyseverfahren ermöglichen es die Unterschiede dank einer modellbasierten Abstraktion zu überwinden. Die darauf aufbauenden Optimierungsmethoden leisten einen Beitrag mehrbeinige Laufroboter hinsichtlich ihrer Stabilität, Geschwindigkeit und Energieeffizienz signifikant weiterzuentwickeln. Konkret wird in dieser Arbeit gezeigt, dass diese systemunabhängigen Methoden die Fähigkeiten und Leistungen der sechsbeinigen Laufroboter *LAURON IVc* sowie *LAURON V* nachweislich verbessern konnten.

1.1. Mehrbeiniges Laufen

Menschen, Tiere und Insekten laufen ganz selbstverständlich ohne bewusste, gedankliche Anstrengungen über Steine, Sand, Gras aber auch Schnee und Eis. Geparden laufen mit beeindruckenden Geschwindigkeiten, Elefanten laufen viele Kilometer pro Tag und Ameisen können während sie über Hindernisse klettern das Vielfache des eigenen Körpergewichts tragen (siehe Abb. 1.1). Das Laufen ist eine sehr effektive, sichere Fortbewegungsart, die nach der Lehre von *Darwin* über viele Generationen hinweg für die vielen, verschiedenen Anforderungen auf sehr unterschiedliche Arten optimiert wurde [58]. Beim Laufen werden im Gegensatz zur radgetriebenen Fortbewegung keine Straßen oder Wege benötigt und es ist sogar möglich

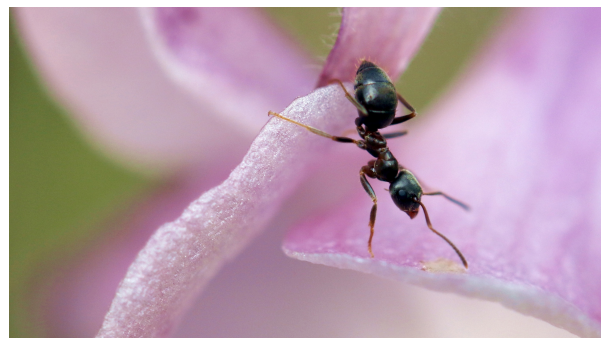
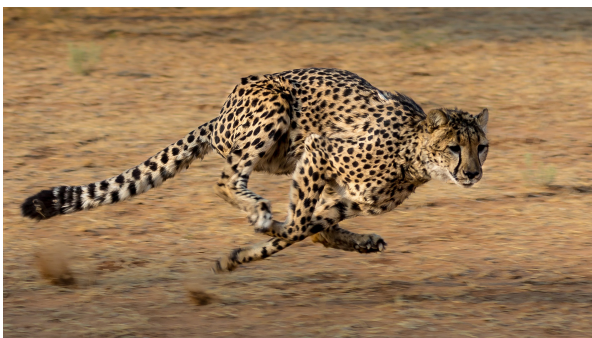


Bild 1.1.: Faszination Laufen: (links) Geparden beeindrucken mit ihrem schnellen, dynamischen Laufen; (rechts) Ameisen können nahezu jedes Hindernis überwinden.

1. Einleitung

einfach über Hindernisse hinwegzulaufen. Laut *Marc Raibert*¹, einem Pionier der Laufrobotik-Forschung, ist nur die Hälfte der Landmasse für rad- oder kettengetriebene Fahrzeuge zugänglich. Eine viel größere Fläche wurde bereits von laufenden Tieren und Insekten erschlossen [175]. Dies ist eine starke Motivation dafür mehrbeinige Laufroboter zu entwickeln, die unabhängig von vorhandener Infrastruktur eingesetzt werden können. Außerdem schont die mehrbeinige Lokomotion im Gegensatz zu Rädern oder Ketten den Untergrund, da der Boden nur punktuell belastet wird. Das natürliche, mehrbeinige Laufen kann sehr gut als Vorbild für neue technische Lokomotionsarten dienen. Das mehrbeinige Laufen ist auch weiterhin ein aktuelles Forschungsthema in der Biologie, aber auch in der Robotik, die häufig versucht anhand von biologischen Vorbildern leistungsstarke Laufroboter zu entwickeln [202][227][48]. Diese Arbeit befasst sich mit der vier-, sechs- oder achtbeinigen Lokomotion (im weiteren Verlauf dieser Arbeit als *mehrbeinige Lokomotion* bezeichnet). Die spannende, zweibeinige Lokomotion wie sie von Menschen und Vögeln genutzt wird, ist nicht Teil der Arbeit. Somit sind die relevanten biologischen Vorbilder des mehrbeinigen Laufens vor allem Insekten (Arthropoda mit sechs Beinen), Säugetiere wie Hunde, Pferde oder Bären (Vertebrata mit vier Beinen) aber auch Spinnen sowie Hundertfüßer (Arthropoda mit mehr als 6 Beinen). Wichtige Aspekte, bei denen Forscher noch viel von diesen natürlichen Vorbildern lernen können, sind die Morphologie, adaptive Laufmuster sowie Verhalten und Reflexe. Die Geländegängigkeit bzw. Stabilität in rauem, schwierigen Gelände bleibt trotz großer Fortschritte im Bereich der Laufroboter noch weit hinter den Fähigkeiten einer Ameise [30]. Die Geschwindigkeit von Insekten und Säugetieren ist nicht nur auf flachem, sondern auch schwierigem Untergrund bisher unerreicht [101]. Technische Systeme können sich auch hinsichtlich der Energieeffizienz noch lange nicht mit Lebewesen messen. Neue Konzepte sowie bahnbrechende Innovationen sind notwendig um an deren Leistungsfähigkeit und Reichweite heran zu reichen [201]. Die vorliegende Arbeit soll einen wichtigen Beitrag dazu leisten effizientere, schnellere und stabilere Laufroboter zu entwickeln.

1.2. Ziel der Arbeit

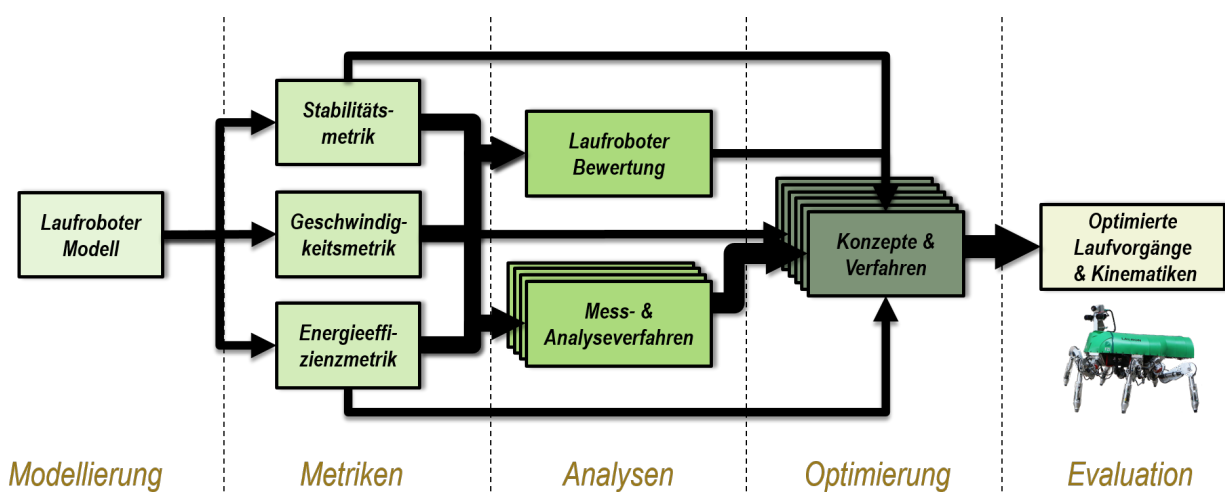


Bild 1.2.: Konzeptdarstellung: Modellierung, Metriken, Analysen und Methoden für effizientes, mehrbeiniges Laufen

¹Raibert'86: 'Because of these limitations, only about half the earth's landmass is accessible to existing wheeled and tracked vehicles, whereas a much greater area can be reached by animals on foot.' Original aus [175]

In den vergangenen Jahren haben mehrbeinige Laufroboter beachtliche Fortschritte gemacht [Heppner et al., 2017][104][1]. Ohne übertragbare, systemunabhängige Modelle oder Analysen kann die Leistung der verschiedenen Systeme jedoch kaum miteinander verglichen werden. Best Practices lassen sich bisher nur schwer erkennen und noch schwieriger auf andere Roboter übertragen. Eine systematische, zielgerichtete Optimierung und Weiterentwicklung von mehrbeinigen Laufrobotern ist somit nicht möglich.

Ziel dieser Arbeit ist es mehrbeinige Laufroboter systemunabhängig vergleichbar zu machen, objektiv zu analysieren um diese in ihrer Leistungsfähigkeit weiter steigern zu können. Dabei liegt der Schwerpunkt der Arbeit auf den folgenden drei Leistungskenngrößen (Key Performance Indicators - KPI): Stabilität, Geschwindigkeit und Energieeffizienz. Durch neue, übertragbare Metriken sollen Vergleiche zwischen Systemen mit unterschiedlicher Kinematik, Größe und Gewicht sowie mit Vorbildern aus der Natur möglich werden. Die systemunabhängigen Metriken und Analysen sollen als Gütekriterien genutzt werden um eine zielgerichtete Konzeption neuer Roboter, aber auch Weiterentwicklung bestehender Roboter zu ermöglichen. Darauf aufbauende Optimierungsverfahren für die Beinbewegungen, dem Klettern am Hang sowie das energie-effiziente Laufen werden die Fähigkeiten von mehrbeinigen Laufrobotern verbessern. Dies wird dazu beitragen, dass Laufroboter in herausfordernden Anwendungen wie dem Transport von Proben in rauem Gelände, der Suche nach verletzten Personen unter Trümmern oder der Erkundung des Meeresbodens immer besser eingesetzt werden können. Die Evaluation der Optimierungsverfahren sowie der modellbasierten Analysen soll in dieser Arbeit mit dem sechsbeinigen Laufroboter *LAURON* (siehe Abb. 1.3) erfolgen.



Bild 1.3.: Zur Evaluation eingesetzter sechsbeiniger Laufroboter *LAURON*: (links) *LAURON IVc*, (rechts) *LAURON V*

1.3. Einordnung und Beitrag der Arbeit

Stand der Forschung: Die Faszination für das mehrbeinige Laufen ist bereits mehrere Tausend Jahre alt. Eine kurze Beschreibung der historischen Entwicklung findet sich in Anhang A im Abschnitt A.1. Wichtiger für diese Arbeit sind die Erkenntnisse aus der Entwicklung moderner Laufroboter seit den 1950er-Jahren. Trotz der relativ kurzen Geschichte moderner Laufroboter existieren weltweit Tausende von Fachartikel und Forschungsergebnisse. Das zeugt von dem hohen internationalen Interesse an der Forschung in diesem Bereich sowie der hohen Relevanz. Viele der entwickelten vier-, sechs- und achtbeinigen Roboter basieren auf biologischen Vorbildern. So entwickelten *Schilling et al.* z.B. das *Walknet* [188], ein künstliches Neuronales Netz (NN), das auf neurowissenschaftlichen Untersuchungen der indischen Stabheuschrecke

Carausius morosus basiert [56]. Dieses NN² wurde erfolgreich eingesetzt um den kleinen, sechsbeinigen Laufroboter *Tarry II* [74] zu steuern und ein Verhalten zu erzeugen, das dem der Stabheuschrecke sehr ähnlich ist. *Ramdyia et al.* untersuchten wieso Insekten das *Tripod* Laufmuster bevorzugen, obwohl es theoretisch schnellere Laufmuster gibt [176]. In der simulativen Studie konnte gezeigt werden, dass das *Tripod* Laufmuster insbesondere für das Laufen entlang vertikaler Wände von Vorteil ist und sich vermutlich deswegen als dominierendes Laufmuster bei Insekten etabliert hat. Die Studie von *Spagna et al.* befasst sich damit wie unterschiedliche Tiere und Insekten über einen Untergrund mit wenigen Kontaktpunkten laufen können [207]. Dazu wurde der Untergrund bis auf ein Gitter reduziert und gezeigt, dass in der Natur ein verteiltes, mechanisches Feedbacksystem genutzt wird um die Beintrajektorien und Laufstrategien effektiv anzupassen. *Kimura und Fukuoka* nutzen einen biologisch inspirierten zentralen Mustergenerator und Reflexe, die auf die Dynamik/Mechanik ihres Roboters abgestimmt sind um auch über schwieriges Gelände sicher laufen zu können [125]. Das neuro-mechanische System muss als Ganzes betrachtet werden um diese robuste Geländegängigkeit zu erreichen. *Beer et al.* fassen in [21] die Ergebnisse aus vielen Jahren biologisch inspirierter Forschung wie folgt zusammen. Es ist immer nur möglich Teilaspekte von der Beobachtung bzw. Untersuchung von Insekten sowie Tieren bei der Entwicklung von Robotern zu berücksichtigen. Wichtig ist es einen stark dezentralen Steuerungsansatz zu verfolgen, die lokalen Reflexe mit der Laufmustererzeugung synergetisch zu kombinieren und die Kinematik sowie Mechanik den Anforderungen der Einsatzumgebung sowie des Steuerungsparadigmas entsprechend zu entwerfen.

Weltweit führend im Bereich der Forschung und Entwicklung von Laufrobotern ist Boston Dynamics, eine private Robotikfirma aus den USA. Der Gründer und CEO von Boston Dynamics ist *Marc Raibert*, ein Laufroboter-Experte, der bereits Ende der 1980er-Jahre am MIT bahnbrechende Ergebnisse mit dynamisch laufenden Robotern präsentieren konnte [175]. Die aktuellen, vierbeinigen Robotersysteme von Boston Dynamics, wie der *SpotMini* [39], sind schnell, robust und können sich auch in schwierigem Gelände zuverlässig fortbewegen. Andere Roboter wie der sechsbeinige *MessorII* [24] von der PUT in Poznan, Polen, konzentrieren sich auf die Entwicklung von anwendungsspezifischen Fähigkeiten, wie dem Navigieren in unbekanntem Gelände. Der *DLR Krabblor* [86] wurde beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen entwickelt und nutzt sechs Finger der DLR-Hand II als Beine. Mit Hilfe der fortschrittlichen, modellbasierten Impedanzregelung kann dieser Laufroboter sich schnell und sicher an verschiedene Untergründe anpassen. Der *DLR Krabblor* wurde, wie der *SpaceClimber* des DFKI Bremen, für Erkundungs- und Forschungsmissionen auf fremden Planeten konzipiert. Der *SpaceClimber* [20] ist ein sechsbeiniger Laufroboter mit vier Gelenken pro Bein. Dies stellt eine Besonderheit dar, da die meisten sechsbeinigen Laufroboter nur drei Gelenke pro Bein besitzen. Das an der CMU entwickelte Robotersystem *SnakeMonster* besteht aus modularen Komponenten und kann mit unterschiedliche Kinematiken eingesetzt werden [115]. Insbesondere die vier- und sechsbeinigen Varianten mit ihrem abgeschlossenen Design und der adaptiven Impedanzregelung sind für Search-and-Rescue Aufgaben gut geeignet. Laufroboter müssen nicht immer über viele Motoren verfügen und teure Hardware nutzen, sondern können wie *DASH* [31] von der Berkeley University, USA, auch aus günstigen Komposit-Materialien und einem einzigen Motor hergestellt werden. *DASH* erreicht trotz dieses einfachen Designs und der nur ca. 10cm Länge eine sehr hohe Laufgeschwindigkeit von 1,5m/s und ist sehr robust gegenüber Stürzen sowie Kollisionen. Abschließend soll an dieser Stelle der neue vierbeinige Laufroboter *ANYmal* [104], der ETH Zürich erwähnt werden.

²NN: Neuronales Netz

ANYmal kann mit seinen vier Beinen und dank der SEA-Antriebe³ dynamisch stabil laufen. Dieser Roboter wurde z.B. erfolgreich auf der *TOTAL ARGOS oil and gas site inspection challenge*⁴ eingesetzt und erreicht ähnliche Laufleistungen wie die Laufroboter von Boston Dynamics. Weitere Details zu den hier erwähnten Systemen sowie weitere, moderne und historische Laufroboter werden im Anhang A vorgestellt. Dieser kurze Auszug zeigt bereits deutlich, wie unterschiedlich die Systeme vor allem hinsichtlich ihrer Lokomotion sind. Der Vergleich zwischen den sehr heterogenen Systemen ist extrem schwierig und benötigt allgemeingültige, systemunabhängige Ansätze.

In der Forschung gibt es bereits einige Metriken für Laufroboter bzw. Metriken, die zwar nicht für Laufroboter entwickelt wurden, jedoch für diese genutzt werden. Ein Laufroboter kann genauso wie ein Tier oder Insekt stolpern, ausrutschen oder fallen. Ein Sturz kann für einen hochkomplexen Roboter mit speziellen Sensoren und komplexer Kinematik erheblichen Schaden zur Folge haben. Entsprechend ist die Stabilität eines Laufroboters ein zentrales, wichtiges Thema. Bereits bei der Entwicklung der ersten, modernen Laufroboter entstand das Stabilitätskriterium der *Static Stability Margin*, auch *SSM* genannt [145]. Die *SSM* definiert: ein Roboter ist stets stabil, wenn dessen auf den Boden projizierter Schwerpunkt innerhalb der Aufstandsfläche liegt (siehe Details zur Definition der Aufstandsfläche in Kapitel 2). Allerdings ist diese Metrik nur für statisches, langsames Laufen sinnvoll, da keine dynamischen Effekte wie die Trägheitsmomente der Beinbewegungen berücksichtigt werden. Insbesondere für das zweibeinige Laufen ist die Stabilität eine schwierige Herausforderung. Das dynamische Stabilitätskriterium *Zero Moment Point (ZMP)* berücksichtigt alle dynamischen Effekte beim Laufen [220]. Der *ZMP* beschreibt den Punkt, indem sich alle Kippmomente aufheben und der Roboter stabil ist. Durch die Regelung aller beweglichen Elemente kann dieser Punkt gezielt verschoben und so der Roboter stabilisiert werden. Mit diesem Ansatz können auch für mehrbeinige Laufroboter Regelungssysteme entwickelt werden, die dynamisches Laufen mit Flugphasen zulassen. Die *Force Angle Stability Margin (FASM)* ist einfacher zu berechnen als die *ZMP* Methode und kann ebenfalls dynamische Effekte berücksichtigen [161]. Allerdings kann diese auch einfach und effektiv für statisch stabile Laufroboter eingesetzt werden. Im Wesentlichen betrachtet die *FASM* die Kippwinkel des Massenschwerpunktes gegenüber allen Kippachsen. Die bisher entwickelten Stabilitätsmetriken unterscheiden in der Regel zwischen Robotern die statisch oder dynamisch stabil laufen.

Für die Beschreibung der Laufgeschwindigkeit gibt es wenige etablierte Metriken. Die Geschwindigkeit eines Körpers entlang einer Raumachse wird in der Physik mit m/s (SI-Einheit) definiert. Laufrobotergeschwindigkeiten werden in der Regel in dieser Form angegeben oder in anderen Skalierungen wie cm/s oder km/h. Diese unterscheiden sich jedoch nur durch einen einfachen Umrechnungsfaktor. Eine alternative Metrik ist die Normierung der Geschwindigkeit anhand der Körperlänge. So wird z.B. in der Arbeit von *Schroer et al.* die Geschwindigkeit von Kakerlaken mit 1,0 – 1,5 *body_lengths/s* angegeben [196]. Solche Angaben finden sich häufiger in wissenschaftlichen Arbeiten aus der Biologie und Robotik. Allerdings wird die Körperlänge sehr unterschiedlich interpretiert und deshalb ist diese zur Normierung eher ungeeignet wie auch *Saranli et al.* bereits festgestellt haben⁵. Die Energieeffizienz ist ein Thema, das nicht nur die Laufrobotik-Forschung interessiert, sondern für alle Fahrzeuge, Flugzeuge und Schiffe relevant ist. Die am häufigsten in der Robotik eingesetzte Metrik, die *Specific Resistance* von *von Karman und Gabrielli*, wurde

³SEA: Serial Elastic Actuator - dies ist ein Antriebskonzept mit einem elastischem Element (z.B. eine Feder) in Serie mit dem Antrieb (Motor). Vorteile: Stöße werden abgefedert, es kann Energie zwischengespeichert werden.

⁴Details zur TOTAL ARGOS Robotik Wettbewerb: <http://www.argos-challenge.com>

⁵Saranli'01: 'For example, "body lengths per second" is clearly not an appropriately normalized measure of bipedal speed' Original aus [187]

sogar eigentlich für den Vergleich von Fahrzeugen und Flugzeugen konzipiert [218]. Die *Specific Resistance* ist eine wichtige Kenngröße für mobile Systems, da sie die Leistung anhand der Masse und Geschwindigkeit normiert. So lassen sich ähnliche Systeme sehr gut miteinander vergleichen. Weiter kann identifiziert werden, bei welcher Geschwindigkeit ein System am effizientesten arbeitet. Problematisch an Verwendung der *Specific Resistance* zur Laufroboterbewertung sind jedoch folgende Aspekte: zum einen wird eine konstante Geschwindigkeit angenommen, die es bei Laufroboter meist nicht gibt, zum anderen wird nicht genau genug spezifiziert, welche Leistung normiert werden soll. Infolgedessen wird z.T. nur die rein mechanische Antriebsleistung der Motoren oder aber die Gesamtleistung des Systems inklusive aller elektronischen Komponenten für die Berechnung der *Specific Resistance* verwendet. In den Arbeiten von Jun Nishii wird für mehrbeinige Laufroboter ein ausführliches, theoretisches Modell hergeleitet um die *Cost of Transport nach Nishi* zu berechnen [155]. Dabei werden detailliert alle Teile der Laufbewegungen mit den Schwing- und Stemmphasen sowie den Bodenkontaktkräften modelliert und auch die Wärmeverluste in der Antriebstechnik berücksichtigt [156]. Die so entwickelte Metrik eignet sich gut um während der Entwicklung Robotermodelle zu analysieren und zu optimieren. Jedoch ist die Metrik in der Praxis schwierig einzusetzen, da sie exakte Bodenkontaktkräfte benötigt, den Schlupf der Füße nicht berücksichtigt und ebenfalls von einer konstanten Laufgeschwindigkeit ausgeht. Viele weitere Arbeiten in diesem Bereich adressieren eine spezifische Kinematik, Design oder einen konkreten Roboter und versuchen dessen Energieeffizienz zu verbessern. De Santos et al. konzentrieren sich z.B. darauf optimale Fußpunkte für einen sechsbeinigen Laufroboter zu finden, der sich auf einer geraden Linie bei konstanter Körperhöhe über rauhes Gelände bewegt [61]. Die Verlustleistungen in den Antrieben werden berücksichtigt und auch viele weitere Details sind gut modelliert. Jedoch wurde auch in dieser Arbeit der Schlupf der Füße nicht betrachtet und die Berechnungen sind so umfangreich, dass die Optimierung eher für theoretische Modelle geeignet ist. Bisherige Metriken und Optimierungsverfahren des Energieverbrauchs sind in der Regel nicht in der Lage die vielfältigen Aspekte der verschiedenen Laufroboter gleichzeitig zu berücksichtigen. Oft sind die Metrik zudem nicht eindeutig definiert oder sie sind messtechnisch sehr schwierig für reale Roboter anzuwenden.

Problemstellung: Die gezeigte Vielfalt an Lösungen für das mehrbeinige Laufen in der Natur, aber auch in der technischen Umsetzung macht es äußerst schwierig die Lokomotion dieser Systeme mit den gleichen Methoden zu analysieren und unabhängig von einer konkreten Kinematik zu optimieren. Wie soll ein vierbeiniger Laufroboter mit einem sechsbeinigen Laufroboter mit vollkommen unterschiedlichen Laufmustern verglichen werden? Wie kann ein starres, klassisches Antriebskonzept mit Harmonic Drive Getrieben mit hydraulischen oder elastischen, nachgiebigen SEA-Antrieben verglichen werden? Aber ohne Vergleichs- und Bewertungsmöglichkeit können auch keine Vor- und Nachteile konkurrierender Ansätze identifiziert werden. Die Abstraktion der Antriebstechnik sowie Kinematik ist dringend notwendig um wesentliche Gemeinsamkeiten identifizieren zu können. Die bisherigen Metriken versuchen zwar Teile der Lokomotionskonzepte zu abstrahieren und vergleichbar zu machen. Jedoch gelingt dies nur bedingt, da die Metriken z.B. wie die *Specific Resistance* eigentlich für Fahrzeuge entwickelt wurden und von konstanten, gleichförmigen Bewegungen ausgehen. Ebenso betrachtet die Normierung der Geschwindigkeit bzgl. der Körperlänge nicht den eigentlichen Lokomotionsapparat, sondern vor allem die Konstruktion bzw. Morphologie des Gesamtsystems. Ohne die Wechselwirkungen zu betrachten und die Lokomotionskonzepte besser zu abstrahieren wird es nicht möglich sein Laufroboter zielgerichtet zu optimieren und weiterzuentwickeln. Auf eine Forschungsfrage reduziert lässt sich die Problemstellung wie folgt zusammenfassen:

Wie können mehrbeinige Laufroboter trotz der großen Unterschiede in ihrer Leistungsfähigkeit systematisch und zugleich systemunabhängig analysiert und weiterentwickelt werden?

Beitrag: Ziel dieser Arbeit ist die systemunabhängige Optimierung der Lokomotion von mehrbeinigen Laufrobotern. Dafür werden unabhängige Metriken entwickelt, die es erlauben die Laufleistung heterogener Roboter objektiv zu beurteilen. Die neuen, modellbasierten Metriken für Stabilität, Geschwindigkeit und Energieeffizienz werden berücksichtigen, dass das Laufen ein schrittbasierter Vorgang ist und darauf achten, dass die Definitionen klar und eindeutig sind um die Vergleichbarkeit zu garantieren. Der Fokus der Arbeit auf die drei Hauptleistungskriterien (Key Performance Indikatoren (KPI: Stabilität, Geschwindigkeit und Energie) leitet sich vor allem aus den Anforderungen an Laufroboter in verschiedenen Einsatzszenarien ab. Das entwickelte, abstrakte Laufroboter-Modell bildet die Basis für die neue Stabilitätsmetrik *Distance Force Stability Measure (DFS)*, die Geschwindigkeitsmetrik *Normalised Walking Velocity (NWW)* sowie die neue, schrittbasierte Energieeffizienzmetrik *Cost per Step (CpS)*. Die Analyseergebnisse bieten bereits einen hohen Mehrwert für die Laufroboter-Forschung, da sie Stärken und Schwächen verschiedener Systeme identifizieren und somit *Best Practices* sichtbar machen. Die neu entwickelten Optimierungsverfahren wie z.B. Ansätze zur gezielten Ansteuerung kinematischer Redundanzen erlauben es die Leistungsfähigkeit von Laufrobotern nachweislich zu steigern. Mit der Evaluation wird gezeigt wie die theoretischen Konzepte und Verfahren konkret in der Praxis eingesetzt wurden um den Laufroboter *LAURON* (siehe Abb. 1.3) erfolgreich weiterzuentwickeln. Die Arbeit leistet damit einen wichtigen Beitrag zur systematischen, systemunabhängigen, holistischen Weiterentwicklung von Laufrobotern. Außerdem vertieft und verbessert sie das Verständnis für die mehrbeinige Lokomotion und kann auch außerhalb der Robotik wertvolle Beiträge liefern. Die Metriken, Analysen aber vor allem die modellbasierten Optimierungsverfahren erweitern den Stand der Forschung im Bereich Robotik und werden dazu beitragen, dass sich die Entwicklungen in dieser Domäne beschleunigen.

1.4. Vorgehen und Gliederung der Arbeit

Nach der Einleitung, die die Arbeit vor allem motiviert, einordnet und vom Stand der Forschung abgrenzt, folgt das Kapitel 2 zu dem Thema **Mehrbeiniges Laufen in der Natur**. Dieses Kapitel klassifiziert zunächst das Laufen als wichtigste terrestrische Lokomotionsart anhand der Anzahl der Beine und gibt Beispiele für natürliche Vorbilder der verschiedenen Kategorien. Anschließend wird untersucht inwiefern eine Klassifizierung auch über die Kinematik oder die Stabilität des Roboters erfolgen kann. In einem weiteren Abschnitt werden vor allem die wichtigsten Grundlagen für das mehrbeinige Laufen eingeführt. Das Kapitel endet mit einer Betrachtung von Skalierungseffekten, die in der Natur identifiziert werden konnten. Im Kapitel 3 **Stand der Forschung im Bereich mehrbeiniger Laufroboter** werden zu Beginn einige historische Entwicklungen sowie die Vielfalt aktueller, mehrbeiniger Laufrobotern vorgestellt. Weiter werden verschiedene Ansätze zur Optimierung mehrbeiniger Laufroboter zusammengefasst und diskutiert. Dabei konzentrieren sich die untersuchten Ansätze auf kinematische, stabilitätsbasierte und energiebasierte Optimierungen. Der Laufroboter *LAURON V* wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und zusammen mit *LAURON IVc* zur Evaluation eingesetzt. In einem kurzen Abschnitt wird die historische Entwicklung dieser Laufroboterreihe beschrieben und auf Besonderheiten von *LAURON V* und *LAURON IVc* eingegangen. Außerdem wird das Anwendungspotential moderner Laufroboter diskutiert und ein Resümee bezüglich dem Stand der Forschung im Bereich mehrbeiniger Laufroboter gezogen. Das Kapitel 4 **Modellierung des mehrbeinigen**

Laufens und Entwicklung geeigneter Metriken nutzt die Erkenntnisse aus dem Kapitel 2 und Anhang A und entwickelt hieraus ein abstrahiertes Modell zur Beschreibung der mehrbeinigen Lokomotion. Weiter werden hier nach einer Analyse und Diskussion bestehender Metriken, neue Metriken zur Analyse und Bewertung von mehrbeinigen Laufvorgängen entwickelt. Die neuen, modellbasierten Metriken konzentrieren sich auf die Stabilität, Geschwindigkeit und Energieeffizienz von mehrbeinigen Laufrobotern. Die Analyse mehrbeiniger Laufroboter steht im Fokus von Kapitel 5 **Analysen und Bewertungskriterien**. Hier wird beschrieben, wieso es notwendig war eine neue Simulationsumgebung speziell für mehrbeinige Laufroboter zu entwickeln und wie diese eingesetzt werden kann, um verschiedene Aspekte des Laufens zu untersuchen. Des Weiteren wird das Konzept des digitalen Zwillings für Laufroboter vorgestellt und gezeigt wie so reale Messdaten mit virtuellen Messdaten kombiniert werden können. Außerdem wird unter anderem ein Verfahren zur kontinuierlichen Schätzung des Roboterschwerpunkts sowie Leistungsaufnahme aller Komponenten, d.h. der Gelenke, Beine und der Onboard-Elektronik-Komponenten erläutert. Analyseverfahren zur Bewertung des kinematischen Arbeitsraumes schließen dieses Kapitel ab. In dem folgendem Kapitel 6 **Optimierung von mehrbeinigen Laufvorgängen** werden diese Arbeitsraumanalysen genutzt um die Anstellwinkel der Beine optimieren zu können. Weiterhin wird gezeigt wie die dynamische Simulationsumgebung genutzt werden kann um verschiedene Roboterkinematiken miteinander virtuell zu vergleichen, zu bewerten und anhand von genetischen Algorithmen zu optimieren. Ein Partikel-Schwarm-Optimierer wurde entwickelt, der die redundanten Freiheitsgrade eines Laufroboters zur Optimierung der gewählten Gütefunktion aktiv nutzen kann. Interaktive, online adaptive Fußpunkttrajektorien erlauben es die Laufbewegungen hinsichtlich Stabilität und Geschwindigkeit anzupassen und zu verbessern. Die systematische Anpassung dieser Trajektorien kann außerdem dazu genutzt werden, die Energieeffizienz merklich zu steigern. In einem weiteren Abschnitt wird gezeigt wie die Abstimmung von reaktiven Haltungskontroll-Verhalten zusammen mit der Beincoordination und den Fußpunkttrajektorien genutzt wurde, um das Gesamtlaufverhalten zu verbessern. Im Kapitel 7 **Evaluation anhand der Roboter LAURON IVc und LAURON V** werden die entwickelten Metriken, Analyseverfahren und Optimierungen anhand realer und virtueller Experimente mit dem sechsbeinigen Laufroboter *LAURON* kritisch bewertet. Zur Entwicklung des Laufroboters *LAURON V* wurden zahlreiche Analysen und Optimierungsverfahren dieser Arbeit eingesetzt. Die gesteigerte Leistungsfähigkeit gegenüber der vorherigen Generation ist somit bereits ein erstes erfolgreiches Evaluationsergebnis. In verschiedenen Experimenten wird gezeigt wie weitere Analysen und Optimierungen dessen Lokomotionsleistung zusätzlich steigern konnten. Das Laufverhalten am Hang und die Energieeffizienz konnten z.B. systematisch verbessert werden. Auch die Laufgeschwindigkeit des Roboters konnte durch Kombination verschiedener Optimierungsschritte nachweislich gesteigert werden. Im letzten Kapitel 8 **Zusammenfassung und Ausblick** werden die Ergebnisse kritisch rekapituliert und der eigene Beitrag hervorgehoben. Im Ausblick werden geplante Erweiterungen und mögliche Ergänzungen der Arbeit diskutiert.

Zudem wird im Anhang A **Mehrbeiniges Laufen in der technischen Umsetzung** die historische Entwicklung von Laufrobotern anhand ausgewählter Ereignisse und Beispiele zusammengefasst. Danach folgt ein ausführlicher Überblick über verschiedene, moderne Laufroboter. Die Auswahl zeigt die Diversität der entwickelten Ansätze für die mehrbeinige Lokomotion. In dem letzten Abschnitt des Anhangs wird ausführlich untersucht inwiefern Laufroboter es bereits in reale Anwendungen geschafft haben, bzw. welche zukünftigen Anwendungsfelder zu erwarten sind.

2. Mehrbeiniges Laufen in der Natur

In der Natur haben sich im Laufe der Zeit Tiere und Insekten mit sehr unterschiedlichen Morphologien hinsichtlich der Größe, Gewicht, Anzahl der Beine und Gelenke entwickelt. In der Robotik dienen oft Insekten wie die Stabheuschrecke, Ameise und Kakerlake, aber auch Säugetiere wie Hunde und Katzen sowie Reptilien und Amphibien als Vorbilder für die Konstruktion, Kinematik und Steuerungskonzepte. Aufgrund dieser großen biologischen Vielfalt in der terrestrischen Lokomotion ist es sinnvoll die Fortbewegungskonzepte systematisch zu analysieren und zu klassifizieren. Im Folgenden werden drei Taxonomien zur Klassifikation von mehrbeinigen Systemen entwickelt. Weiter werden die wichtigsten Grundlagen des mehrbeinigen Laufens eingeführt. Abschließend werden bekannte Skalierungseffekte beim Laufen in der Natur untersucht.

2.1. Taxonomie terrestrischer Lokomotionsarten

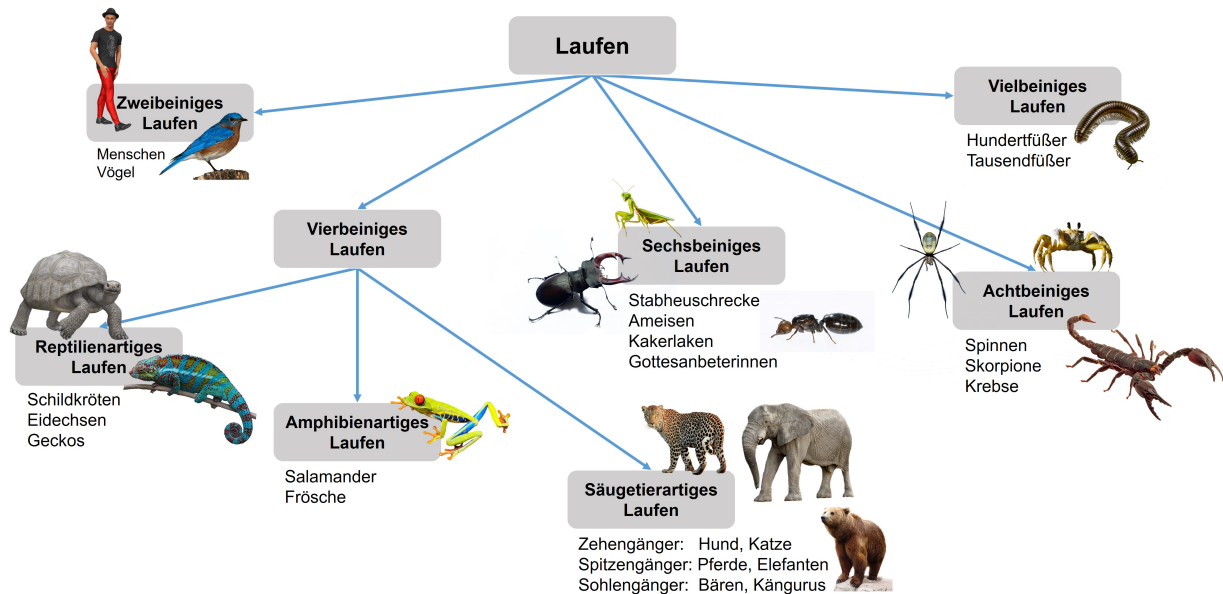


Bild 2.1.: Beinbasierte Taxonomie der terrestrischen Lokomotionsarten.

In dieser Arbeit werden nur terrestrische Lokomotionsarten mit Beinen betrachte, so dass Schwimmen und Fliegen im Weiteren nicht betrachtet werden. In der Natur findet sich eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Konzepte für das mehrbeinige Laufen. Um die verschiedenen Konzepte systematisch vergleichen zu können sollen diese anhand geeigneter Taxonomien klassifizieren werden. Die erste Taxonomie für die terrestrischen Lokomotionsarten basiert auf der Anzahl der Beine und ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Die Anzahl der Beine zu nutzen ist eine klare, eindeutige Möglichkeit viele, verschiedene Lokomotionsarten zu klassifizieren. Die beinbasierte Taxonomie wird in der Robotik besonders häufig eingesetzt. So können z.B. die vierbeinigen Laufroboter (Quadruped) eindeutig von den sechsbeinigen Laufrobotern (Hexapod) unterschieden werden. In der Abb. 2.1 wurde der Vollständigkeit halber auch das zweibeinige Laufen mit

aufgenommen. Die Arbeit konzentriert sich im Weiteren auf mehrbeinige Systeme, die mehr als zwei Beine besitzen. Auffällig in der Grafik ist vor allem, dass sich das vierbeinige Laufen sehr stark unterscheidet. So gibt es zum einen Schildkröten oder Amphibien, die langsam sind und ihren Körper beim Laufen z.T. sogar absetzen, zum anderen gibt es Katzen oder Pferde, die äußerst dynamisch und agil mit aktiven Flugphasen laufen können [152]. Die Unterscheidung der vierbeinigen Lokomotion basiert auf den zugrundeliegenden Kinematiken. Weitere Details finden sich im Abschnitt 2.2. Insekten besitzen sechs Beine und die meisten nutzen auch stets alle sechs Beine zur Lokomotion. Dies bringt Vorteile beim Laufen entlang vertikaler Flächen und sorgt für beeindruckende Kletterfähigkeiten [176]. Nur in einigen Sonderfällen können Insekten auch mit weniger als sechs Beinen laufen wie z.B. die Kakerlake beim dynamischen Rennen [76]. Das Laufen mit mehr als 6 Beinen wie bei einigen Arthropoden (z.B. Spinnen oder Hundertfüßer) kann als synchronisierte, kombinierte Lokomotion mit mehreren Beinpaaren nach den Konzepten der vier- und sechsbeinigen Lokomotion modelliert werden.

2.2. Taxonomie des mehrbeinigen Laufens anhand der Kinematik

Insekten, Reptilien und Säugetiere unterscheiden sich nicht nur in der Anzahl der Beine, Größe und Gewicht, sondern auch durch die grundlegende Anordnung der Beine am Zentralkörper. Säugetiere haben ihre Beine eher eng am Körper anliegen und besitzen somit eine wesentlich kleinere Aufstandsfläche. Insekten, aber auch Amphibien und Reptilien stehen hingegen breitbeiniger, was zu einer wesentlich größeren Aufstandsfläche und somit einer erhöhten Stabilität führt. *Alexander* unterscheidet die terrestrische Lokomotion

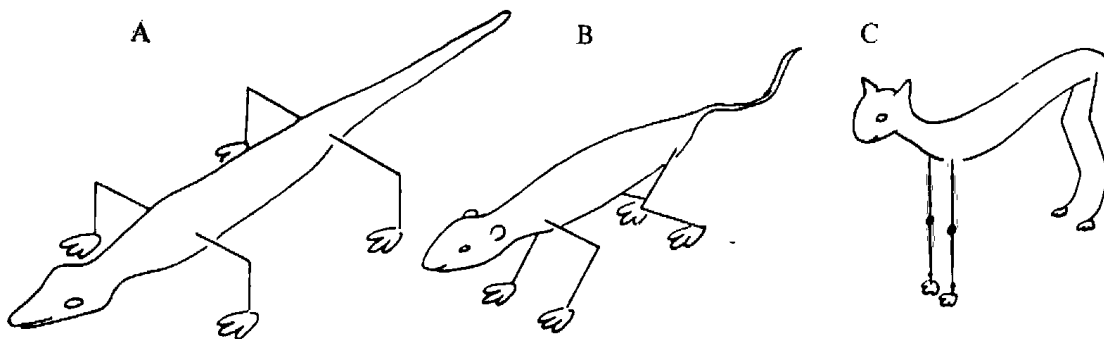


Bild 2.2.: Unterscheidung der Lokomotion nach kinematischer Anordnung der Beine [6]: (links) Reptilien oder Amphibien haben die Beine seitlich am Körper ausgestreckt und laufen somit sehr breitbeinig, (mittig) kleinere Säugetiere wie Mäuse laufen mit den Beinen unterhalb ihres Körpers, die Beine sind auch stets gebeugt, (rechts) größere Säugetiere wie Pferde oder Elefanten haben ihre Beine ebenfalls unterhalb des Körpers, diese sind jedoch meist gestreckt. Quelle [6]

von Säugetieren anhand dreier unterschiedlicher Kinematiken [6]. In der Abbildung 2.2 sind diese Kinematiken mit der Anordnung der Beine am Zentralkörper dargestellt. Amphibien, Reptilien aber auch Insekten besitzen einen stabileren Stand und neigen eher dazu statisch stabil zu laufen (mehr Details zu statischer Stabilität in Abschnitt 4.2.1). Allerdings benötigen sie auch deutlich höhere Drehmomente um ihr eigenes Körpergewicht zu tragen, da sich der effektive Hebelarm beim breitbeinigen Stehen und Laufen verlängert. Amphibien und Reptilien lösen dieses Problem, indem sie regelmäßig ihren Körper ablegen oder damit sogar beim Laufen über den Boden schleifen. Insekten hingegen haben aufgrund der Exoskelett-Bauweise aus

Chitin ein deutlich besseres Kraft-Gewicht-Verhältnis und können problemlos die erhöhten Momente aufbringen. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte kinematische Taxonomie für mehrbeinige Laufroboter ist in der Abb. 2.3 visualisiert. Als Erweiterung zu der Darstellung von *Alexander* [6] wurden die sechsbeinigen Insekten mit aufgenommen. Im Vergleich zu der reptilienartigen Kinematik liegt der Schwerpunkt des Zentralkörpers noch tiefer. Ansonsten ist die Anordnung der Beine am Zentralkörper ähnlich. Wichtigster Unterschied zwischen Insekten und Reptilien bleibt somit die Anzahl der Beine. Auf die Darstellung einer spinnenartigen bzw. achtbeinigen Kinematik wurde verzichtet, da diese vergleichbar zu der sechsbeinigen Kinematik ist. Das säugetierartige Laufen wurde in der Abb. 2.3 unterschieden in Zehengänger, Sohlengänger und Spitzengänger. Auch wenn sich die Anzahl der Knochen und Gelenke bei den Säugetieren kaum unterscheiden, so werden die Gelenke doch sehr unterschiedlich verwendet. Am anschaulichsten lässt sich der Unterschied erklären, wenn man den menschlichen Fuß (auch eine Säugetierkinematik) als Referenz verwendet und die verschiedenen Lokomotionsarten betrachtet. Normalerweise läuft der Mensch mit der

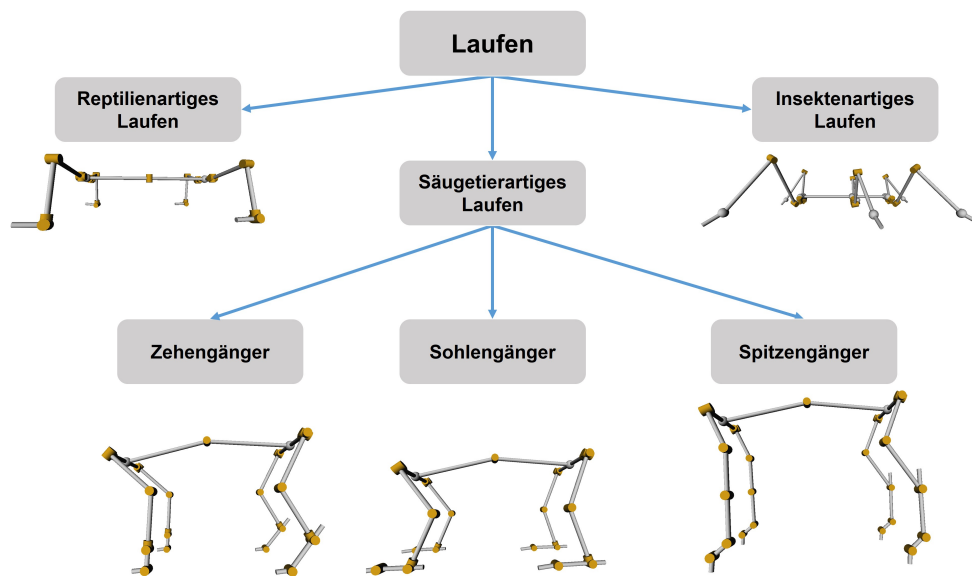


Bild 2.3.: Kinematische Taxonomie der terrestrischen Lokomotionsarten.

flachen Sohle des Fußes und ist damit ein typischer Sohlengänger. Vierbeinige Sohlengänger sind z.B. Bären und Menschenaffen. Läuft der Mensch nur auf dem vorderen Teil des Fußes bzw. den Zehen, würde dies dem Laufen eines Zehengängers entsprechen. Hunde, Katzen und Mäuse sind typische Vertreter der Zehengänger und erreichen mit dieser Kinematik beeindruckende Geschwindigkeiten. Der Spitzentanz einer Ballerina, die nur auf den Zehenspitzen läuft, entspricht in etwa der Lokomotion eines Spitzengängers. Huftiere wie Pferde, Giraffen oder Elefanten gehören zu der Gruppe der Spitzengänger. Die größten und schwersten vierbeinigen Tiere sind Spitzengänger. Diese Kinematik eignet sich große Lasten zu tragen. In der Regel werden Roboter nach dem Vorbild der insektenartigen Kinematik, der vierbeinigen Zehengänger oder Spitzengänger modelliert und konstruiert. Mehrbeinige Roboter lassen sich gut anhand der beschriebenen kinematischen Taxonomie klassifizieren.

2.3. Taxonomie des mehrbeinigen Laufens anhand der Stabilität

In der Natur haben sich sehr unterschiedliche, mehrbeinige Lokomotionsarten entwickelt. Neben den Unterscheidungsmöglichkeiten über die Morphologien d.h. über die Anzahl der Beine (siehe Abschnitt 2.1) oder

über die Anordnung und Funktion der Beine (siehe Abschnitt 2.2), ist es auch möglich den Laufvorgang unabhängig von der Morphologie zu betrachten. Ein wichtiger, markanter Unterschied ist die Stabilität beim Laufen. Statisch stabiles Laufen bezeichnet dabei eine Lokomotion, bei der zu jedem Zeitpunkt das System stabil ist und nicht umkippen kann. Im Wesentlichen muss hierzu der auf den Boden projizierte Schwerpunkt innerhalb der Aufstandsfläche liegen. Die Aufstandsfläche wird von den Beinen mit Bodenkontakt aufgespannt (siehe Abschnitt 2.4). Die Bestimmung der dynamischen Stabilität ist deutlich schwieriger. Ein System gilt im Allgemeinen als dynamisch stabil, wenn es seine Laufbewegung längere Zeit aufrecht halten kann ohne dass der Zentralkörper mit dem Boden kollidiert. Der Schwerpunkt liegt bei der dynamischen Stabilität nicht mehr innerhalb der Aufstandsfläche, da nicht mehr nur der Schwerpunkt für ein Umkippen oder Fallen betrachtet werden muss, sondern auch dynamische Effekte wie z.B. die Trägheit des Zentralkörpers. Die meisten Tiere können sowohl dynamisch wie auch statisch stabil laufen. In der Regel bevorzugen langsame Insekten, wie die Stabheuschrecke, die statisch stabile Lokomotion. Schnellere Insekten, wie die amerikanische Kakerlake, laufen hingegen auch dynamisch stabil. Zahlreiche Forschungsarbeiten befassen sich aktuell mit der Analyse der statischen und vor allem dynamischen Lokomotion von Tieren und Insekten [15][221][133]. Weitere Details zu der statischen sowie dynamischen Stabilität, der Aufstandsfläche sowie den Metriken zur Bestimmung der messbaren Stabilität werden im Abschnitt 2.4 im Rahmen der Einführung der Grundlagen kurz bzw. später bei der Entwicklung der neuen Metriken im Abschnitt 4.5 im Detail vorgestellt. In der Robotik wird sehr oft zwischen statisch und dynamisch stabilen Laufrobotern unterschieden. In

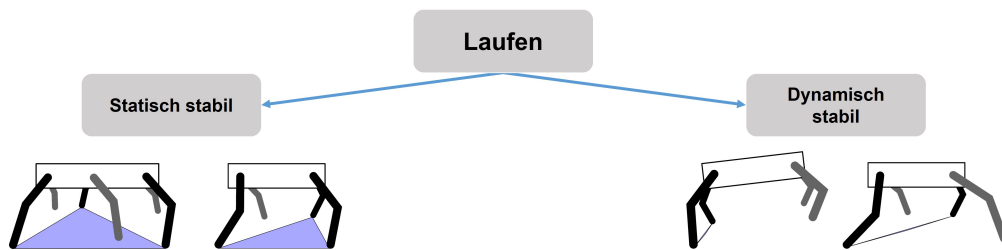


Bild 2.4.: Stabilitätsbasierte Taxonomie der terrestrischen Lokomotion.

den meisten Fällen sind dynamische Laufroboter schneller und energieeffizienter als statisch stabile Laufroboter. Die Anforderungen an die Mechanik sowie Regelung sind deutlich höher beim dynamischen Laufen, da sehr schnelle Reaktionen auf Störungen notwendig sind. Laufroboter, die in der Lage sind dynamisch stabil zu laufen, können meist auch statisch stabil laufen, wenn z.B. das Gelände sehr schwierig wird. Anders herum können statisch stabile Laufroboter aufgrund ihrer Mechanik und Aktuatorik meist nicht dynamisch stabil laufen. Mehrbeinige Laufroboter lassen sich gut mit der eingeführten, stabilitätsbasierten Taxonomie klassifizieren.

2.4. Grundlagen des mehrbeinigen Laufens

Der folgende Abschnitt beschreibt die wichtigsten Grundlagen des mehrbeinigen Laufens. Dies dient zum einen zur Einführung der in dieser Arbeit verwendeten Begriffe und zum anderen als Grundlagen für das weitere Verständnis der Arbeit.

Schwing- und Stemmphase Die mehrbeinige Lokomotion basiert auf den Schwing- und Stemmphasen der Beine. Die Schwingphase beginnt, wenn der Fuß den Bodenkontakt verliert und das Bein sich in Lauf-

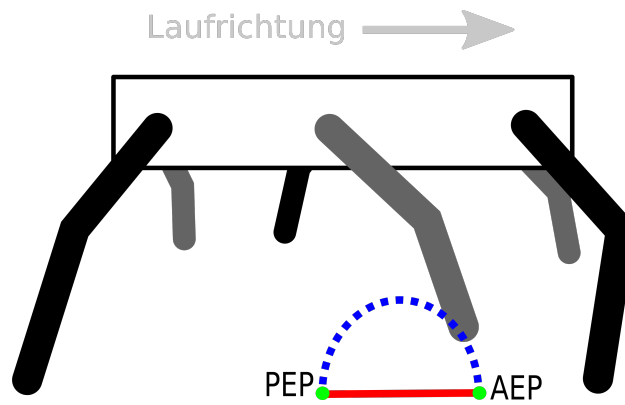


Bild 2.5.: Darstellung einer Schwing- und Stembewegung bei der mehrbeinigen Lokomotion: (blaue gepunktete Linie) Schwingbewegung in der Luft ohne Bodenkontakt, (rote Linie) Stembewegung mit Bodenkontakt, (grüne Punkte) *AEP* (Anterior Extreme Position) und *PEP* (Posterior Extreme Position) definieren die Start- und Endpunkte der Schwing- und Stembewegung im lokalen Beinkoordinatensystem.

richtung in der Luft bewegt (siehe blaue gestrichelte Linie in Abb. 2.5). Die Stemmphase schließt an die Schwingphase an und beginnt mit dem ersten Bodenkontakt am Ende der Schwingphase (siehe rote Linie in Abb. 2.5). Während der Stemmphase bewegt sich das Bein entgegen der Laufrichtung und stemmt so den Körper in Laufrichtung.

Zykluszeit Die *Zykluszeit* T ist die Zeit, die ein einzelnes Bein braucht um eine Schwing- und eine Stembewegung vollständig durchzuführen. Am Ende der *Zykluszeit* T befindet sich das Bein an der gleichen Stelle wie zu Beginn der *Zykluszeit* (in relativen Koordinaten zum Zentralkörper). Die *Zykluszeit* T kann von den meisten Insekten und Tieren verkürzt werden um die Laufgeschwindigkeit zu erhöhen. Eine kürzere *Zykluszeit* führt zu einer erhöhten Schrittfrequenz f .

AEP, PEP, Schrittweite und Schritthöhe Der *AEP* (Anterior Extreme Position) Punkt beschreibt die Stelle, an der der Fuß den Boden am Ende der Schwingphase erstmals wieder berührt. Der *PEP* (Posterior Extreme Position) Punkt definiert analog den Punkt, an dem der Fuß am Ende der Stemmphase letztmalig den Boden berührt bevor das Bein in die Schwingphase wechselt. Die beiden Punkte definieren somit im relativen Koordinatensystem des Zentralkörpers die Positionen, an denen jeweils der Wechsel zwischen der Schwing- und Stemmphase stattfindet (siehe grüne Punkte in Abb. 2.5). Die *Schrittweite* ist der euklidische Abstand zwischen dem *AEP* und dem *PEP*. In der Regel kann die *Schrittweite* von Insekten und Tieren sowie Robotersystemen dynamisch beim Laufen angepasst werden. Die *Schritthöhe* ist durch den höchsten Punkt der Schwingbewegung definiert.

Belastungsfaktor und Phasenverschiebung Der sogenannte Belastungsfaktor oder auch *Dutyfactor* β definiert den zeitlichen Anteil der Stemmphase relativ zur gesamten *Zykluszeit* [8].

$$\beta = \frac{\text{Stemmzeit}}{\text{Zykluszeit } T} \quad [0; 1] \quad (2.1)$$

Bei einem *Dutyfactor* von 0,5 befindet sich das Bein somit die gleich Zeit in der Luft wie auf dem Boden. Statisch stabiles Laufen mit einem sechsbeinigen Laufroboter kann keinen *Dutyfactor* kleiner 0,5 erreichen, da ansonsten aktive Flugphasen (alle sechs Beinen in der Luft) vorkommen müssten. Die *Phasenverschie-*

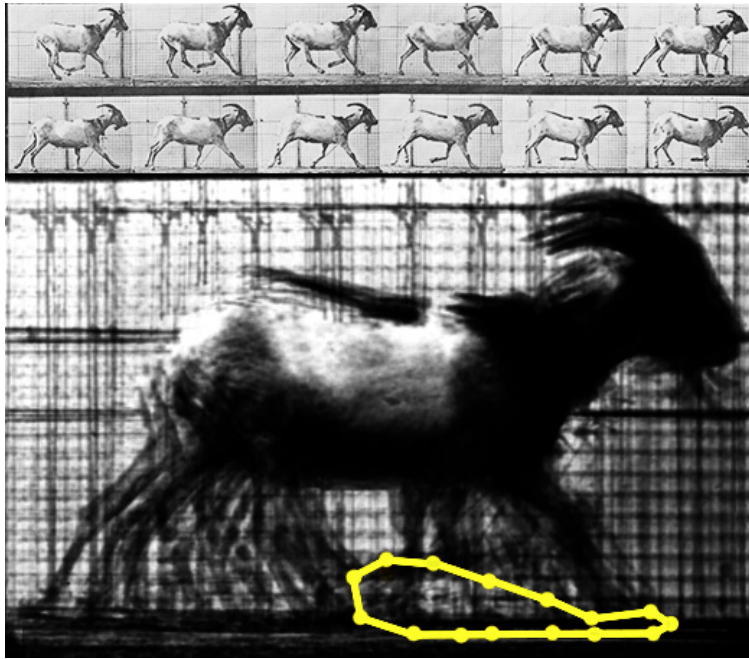


Bild 2.6.: Darstellung der Schwing- und Stembewegung einer galoppierenden Ziege. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2014a]

Die *Phasenverschiebung* θ beschreibt den zeitlichen Offset zwischen zwei Beinen hinsichtlich dem Start der Schwingphase [7]. Die *Phasenverschiebung* wird normiert auf die *Zykluszeit* und kann somit Werte zwischen 0 und 1 einnehmen. Üblicherweise wird die *Phasenverschiebung* zu dem ersten Referenzbein definiert.

$$\theta = \frac{\text{Beginn der Schwingphase}}{\text{Zykluszeit } T} \quad [0; 1] \quad (2.2)$$

Der *Dutyfactor* und die *Phasenverschiebung* können zusammen verwendet werden um Laufmuster zu klassifizieren bzw. zu beschreiben [7].

Trajektorien Eine Trajektorie ist eine zeitliche Gelenkwinkelabfolge, die im Allgemeinen die Bewegung eines Roboters beschreibt. Im Kontext von Laufrobotern spielen Trajektorien vor allem bei den Schwing- und Stembewegungen eine wichtige Rolle. Eine Trajektorie, die die Bewegung eines Roboterbeins mit drei Gelenken (α, β, γ) während der Schwingphase beschreibt, sieht wie folgt aus:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \alpha_0 & \beta_0 & \gamma_0 \\ \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_k & \beta_k & \gamma_k \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Für die Schwingbewegung bei Laufrobotern werden diese Trajektorien meist als kartesische Trajektorien der Fußspitze im Roboterkoordinatensystem definiert:

$$FP = \begin{bmatrix} x_0 & y_0 & z_0 \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_k & y_k & z_k \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Die Orientierung der Fußspitze wird in der Regel nicht näher betrachtet. Durch die Darstellung im Roboterkoordinatensystem erhält der Entwickler eine gute Vorstellung über die resultierende Form der Beinbewegung. In der Abbildung 2.7 sind einige Beispiele für Schwing- und Stemmtrajektorien von Laufrobotern zu sehen. Außerdem sind in der Abb. 2.5 mit der blauen und roten Linie die Beintrajektorien räumlich dargestellt. Meist werden sehr einfache Formen wie Rechteck-, Kreis- oder Sinusfunktionen verwendet um die Trajektorien zu definieren. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass an den Übergängen von der Schwing- zur Stemmphase ein möglichst stetiger Übergang definiert wird, da es ansonsten zu sprunghaften Bewegungen des Roboters kommen kann. Sollen besonders glatte Trajektorien verwendet werden, können neben den Positionen auch die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen definiert werden. In der Natur sind die Trajektorien deutlich komplexer und zeigen vor allem interessante Details am Anfang und Ende der Schwingphase. In der Abbildung 2.6 ist eine Beintrajektorie einer galoppierenden Ziege abgebildet, die aus Fotografien von *Eadweard Muybridge* rekonstruiert wurde [152].

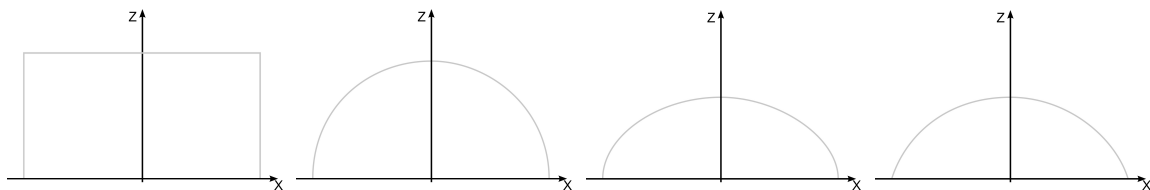


Bild 2.7.: Beispiele für Schwing- und Stemmtrajektorien:(links) rechteckige Trajektorie, (mittig links) halbkreisförmige Trajektorie, (mittig rechts) halbelliptische Trajektorie, (rechts) sinusförmige Trajektorie. Quelle [Hel12]

Laufmuster-Diagramm Die sogenannten Laufmuster-Diagramme oder auch *Gait Diagrams* werden in der Biologie aber auch in der Robotik verwendet um Laufmuster zu beschreiben. Dabei wird in dem *Gait Diagram* die zeitliche Abfolge der Schwing- und Stemmphasen jedes einzelnen Beines dargestellt. Der zeitliche Verlauf ist in der Standardform entlang der Abszissenachse abzulesen. Die Schwing- und Stemmphasen werden als Null und Eins oder dunkle Balken visualisiert. Eine häufige, typische Darstellungsform ist in Abb. 2.8 zu sehen. Ähnlich wie die Visualisierung der Phasen variiert auch die Nomenklatur zur Definition der Beine. Mit Zuhilfenahme der Legende kann jedem *Gait Diagram* aber schnell und einfach entnommen werden, wie viele Beine zu jedem Zeitpunkt den Boden berühren, in der Luft schwingen und wie der zeitliche Versatz zwischen den Beinen (*Phasenverschiebung*) aussieht.

Mehrbeinige Laufmuster Durch die Koordination der Schwing- und Stemmphase zwischen den verschiedenen Beinen entsteht ein Laufmuster. Je nachdem mit wie vielen Beinen gelaufen wird, sind sehr unterschiedliche Laufmuster möglich. Unabhängig von der Anzahl der Beine gibt es einige Laufmuster Eigenschaften, die vor allem vom *Dutyfactor* abhängen. Ein *reguläres Laufmuster* wird dadurch definiert, dass alle Beine den gleichen *Dutyfactor* β verwenden (Ausnahmen sind in der Natur eher selten). Weiter spricht

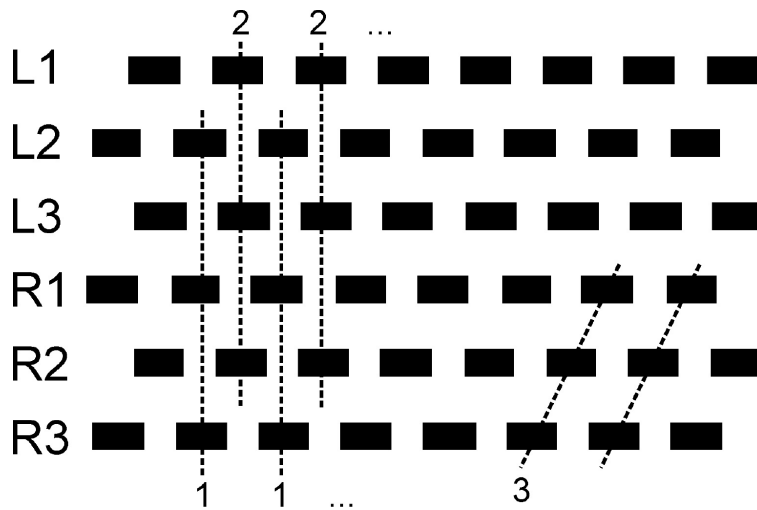


Bild 2.8.: Das *Gait Diagram* veranschaulicht die Schwing- und Stemmphasen aller Beine im zeitlichen Verlauf. Gestrichelte Linien mit Zahlen zeigen hier die Effekte der sogenannten *Cruse Regeln* zur Koordination eines natürlichen Laufmusters bei sechsbeinigen Insekten [54]. Diese Regeln wurden von neurowissenschaftlichen Untersuchungen bei der Stabheuschrecke abgeleitet. Quelle [56].

man von einem *symmetrischen Laufmuster*, wenn zwischen dem linken und rechten Bein eines Beinpaars eine *Phasenverschiebung* θ von 0,5 vorliegt. Säugetiere nutzen in der Natur nahezu ausschließlich *symmetrische Laufmuster* [7]. Zudem gibt es *wellenartige Laufmuster*, bei denen sich die Schwingphase der Beine wellenartig von vorne nach hinten oder von hinten nach vorne ausbreiten. Eine detaillierte Erklärung der verschiedenen Laufmuster findet sich in [203].

Vierbeinige Laufmuster Im Folgenden werden typische Laufmuster für die vierbeinige Lokomotion vorgestellt. In der Abbildung 2.9 sind sechs verschiedene Laufmuster skizziert, bei denen jeweils nur ein

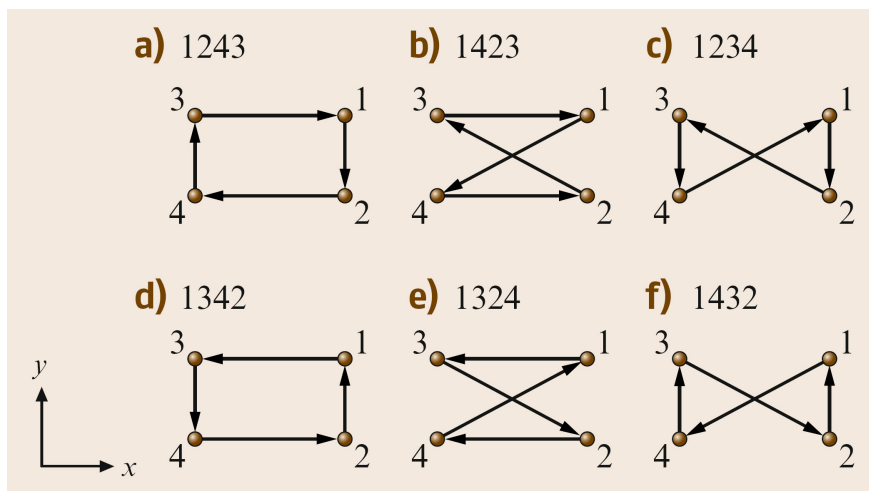


Bild 2.9.: Übersicht aller *Creep-Gait*-Laufmuster für einen vierbeinigen Laufroboter. Quelle [203]

Bein schwingt, während die anderen drei Beine die Stemmbelegung ausführen (mit einem *Dutyfactor* von 0,75 bleiben immer drei Beinen auf dem Boden). Die Zahlen nummerieren die Beine in einer festen Reihenfolge (vorne links entspricht dabei oft 0 oder 1). Die Pfeile geben an, in welcher Reihenfolge die Beine nacheinander die Schwingbewegung ausführen. Diese sogenannten *Creep-Gait*-Laufmuster sind für die sichere, statisch stabile Lokomotion geeignet. Drei Beine auf dem Boden bieten eine hohe Stabilität. Das

Laufmuster *1423* bietet die maximale Stabilität bei einer vorwärts gerichteten Laufbewegung. Dieses besondere Laufmuster wird auch *Crawl-Gait* genannt. Schildkröten sind natürliche Vertreter, die vor allem im *Crawl-Gait* laufen.

Vierbeinige Laufmuster, bei denen es überlappende oder gleichzeitige Schwingphasen mehrerer Beine gibt, werden als dynamische Laufmuster definiert. Die Anzahl an verschiedenen dynamischen Laufmuster ist sehr groß, da jede unterschiedliche Phasenverschiebung quasi ein neues, spezielles Laufmuster definiert. Die wichtigsten vierbeinigen Laufmuster sind in der Abbildung 2.10 mit dazugehörigem *Gait Diagram* dargestellt. Bei Pferden werden die drei natürlichen Laufmuster Schritt (walk), Trab (trot) und Galopp (galop)

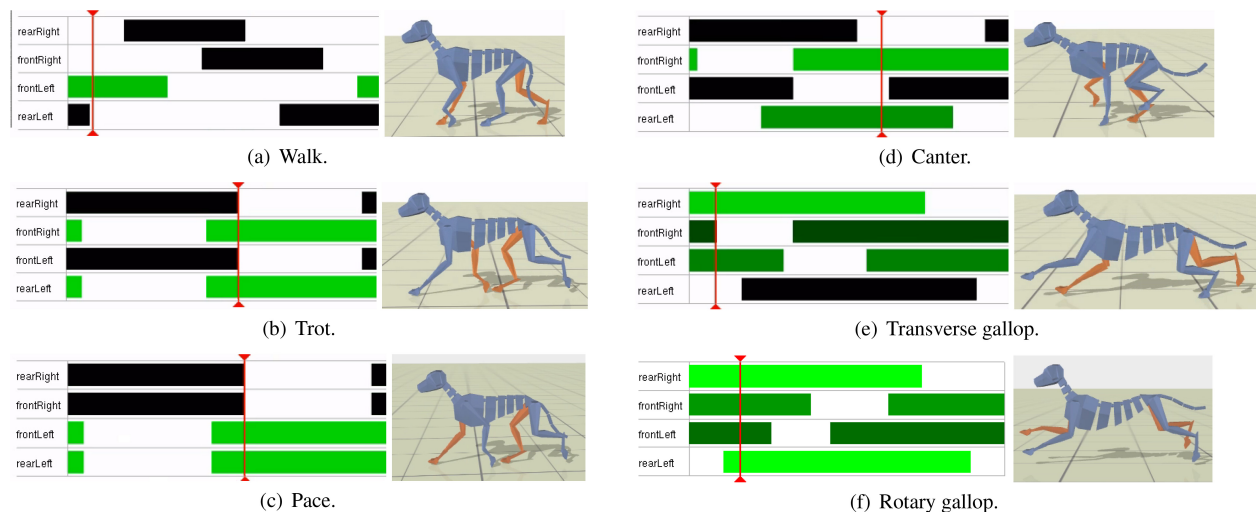


Bild 2.10.: Auswahl der wichtigsten dynamischen, vierbeinigen Laufmuster. Die rote, vertikale Linie im *Gait Diagram* entspricht der Darstellung rechts neben dem *Gait Diagram*. Quelle [50]

beobachtet. Es gibt jedoch zahlreiche weitere Laufmuster, die bei Pferden antrainiert werden können. Für vierbeinige Laufroboter sind noch viele weitere dynamische Laufmuster realisierbar. In der Regel werden jedoch die Laufmuster aus der Abbildung 2.10 verwendet.

Sechsbeinige Laufmuster In diesem Abschnitt werden typische Laufmuster für die sechsbeinige, statisch stabile Lokomotion beschrieben. Das *Tripod* Laufmuster ist das bekannteste Laufmuster, bei dem jeweils drei Beine gleichzeitig eine Schwingbewegung ausführen (*Dutyfactor* $\beta = 0,5$). Dieses schnellste, statisch stabile Laufmuster ist links in Abbildung 2.11 dargestellt. Weitere Laufmuster sind der *Tetrapod* (stets vier Beine auf dem Boden - zwei Beine schwingen - siehe mittig in Abb. 2.11) und der *Pentapod* (stets fünf Beine auf dem Boden - nur 1 Bein schwingt - siehe rechts in Abb. 2.11). Beim *Tetrapod* und *Pentapod* gibt es sehr viele unterschiedliche Schrittfolgen, ähnlich wie bei den Creep-Gaits bei der vierbeinigen Lokomotion. Oft kann das Laufmuster über den *Dutyfactor* $\beta = [0,5; 1,0]$ fließend eingestellt werden. Die Namen der Laufmuster lassen vermuten, dass dies feste Laufmuster sind. Jedoch ist vor allem bei Insekten ein fließender Übergang zwischen den Laufmustern die Regel und klare, eindeutige Laufmuster eher die Ausnahme. In der Natur beobachtet man eine Mischung zwischen einem *Tripod* und *Tetrapod* Laufmuster [52]. Besonders für sechsbeinige Laufroboter findet man in der Literatur auch sogenannte „Freie Laufmuster“. Diese Laufmuster werden meist durch übergeordnete Koordinationsregeln definiert, die dafür sorgen, dass die Schwing- und Stembewegungen nur in bestimmten Konfigurationen zulässig sind [Roennau et al., 2010a]. Ein sehr bekannter Ansatz für ein solches, freies Laufmuster wurde von *Holk Cruse*

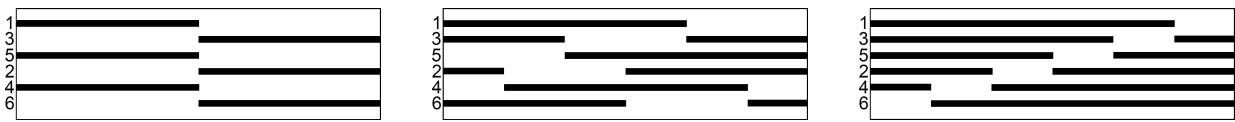


Bild 2.11.: Sechsheinige Laufmuster: Schwarze Balken = Bodenkontakt: (links) Tripod mit $Dutyfactor \beta = 0,5$, (mitig) Tetrapod mit $Dutyfactor \beta = 0,67$, (rechts) Pentapod mit $Dutyfactor \beta = 0,83$. Quelle [Hel12]

entwickelt [32][55]. Die sogenannten *Cruse Regeln* basieren auf neurowissenschaftlichen Untersuchungen der Stabheuschrecke und erzeugen ein Laufmuster, das sich zwischen einem Tripod und Tetrapod einstellt [54]. Die *Cruse Regeln* wurden auch schon auf zahlreichen, sechsbeinigen Laufroboter implementiert und erzeugen ein natürliches Laufmuster, das dem Laufmuster der Stabheuschrecke sehr ähnlich ist [87].

Koordinationsmechanismen und Software-Architekturen Die Erzeugung der Laufbewegungen basiert bei allen Laufrobotern auf zwei wesentlichen Mechanismen. Zum einen die Bewegung der Fußspitze während der Schwing- und Stemmphase. Die genaue Bewegung wird durch die sogenannte Bewegungstrajektorie definiert (siehe Abschnitt zu Bewegungstrajektorie). Zum anderen die Koordination der Schwing- und Stemmphase zwischen den verschiedenen Beinen. Diese wird durch das Laufmuster festgelegt (siehe Abschnitt zu mehrbeinigen Laufmuster). Beide Mechanismen sind eng miteinander verzahnt und müssen gut aufeinander abgestimmt werden. Dabei gibt es verschiedene Konzepte, wie diese Synchronisation erfolgen kann. Eine Möglichkeit die Laufbewegung zu erzeugen sind klassische regelungstechnische Ansätze, bei dem die Lokomotion aus mehreren komplexen Regelkreisen erzeugt wird. Insbesondere dynamisch laufende Roboter setzen komplexe Regler ein um die notwendigen, schnellen Bewegungen präzise zu synchronisieren [104][201]. Alternativ gibt es zentrale oder dezentrale, reaktive Software-Architektur Ansätze. Hierzu zählen die Subsumption Architektur oder Verhaltensnetzwerke wie sie bei *LAURON* eingesetzt werden [Kerscher et al., 2008a][40]. Die Vielfalt an möglichen Software-Architekturen sowie Regelungs- und Steuerungskonzepten ist sehr groß und sollte nach Möglichkeit zu der Aktuatorik, Kinematik und dem Einsatzzweck des Roboters passen.

Aufstandsfläche Die *Aufstandsfläche* wird bei einem Laufroboter durch die konvexe Hülle der Bodenkontaktpunkte definiert (Füße mit Bodenkontakt). Je nach Anzahl der Beine des Roboters und Anzahl der Bodenkontakte handelt es sich dabei um ein Polygon mit drei bis N Ecken. Theoretisch können auch zwei Füße eine *Aufstandsfläche* aufspannen, wenn die Füße nicht nur aus einem Punktkontakt bestehen. Jedoch soll dieser Sonderfall, der vor allem für Humanoide Roboter relevant ist, nicht weiter in dieser Arbeit betrachtet werden. Da es sich um eine konvexe Hülle handelt, muss nicht jeder Fuß mit Bodenkontakt einen Eckpunkt der *Aufstandsfläche* bilden (siehe z.B. in Abb. 2.12 unten rechts). In der Abbildung 2.12 sind verschiedene Aufstandsflächen beispielhaft dargestellt.

Stabilität Grundsätzlich wird bei Laufrobotern zwischen statischer und dynamischer Stabilität unterschieden. Die Stabilität eines Laufroboters ist ein sehr wichtige Kenngröße, die in dieser Arbeit von zentraler Bedeutung ist. Die Stabilität bildet zusammen mit der Geschwindigkeit und Energieeffizienz die Key-Performance-Indikatoren dieser Arbeit, die mittels neuer Metriken analysiert und anschließend optimiert werden sollen. Aus diesem Grund gibt es eine detaillierte Definition und Herleitung der verschiedenen Stabilitätskriterien für Laufroboter in Abschnitt 4.2.1. Eine kurze Definition und Erklärung zur Stabilität von Laufrobotern findet sich auch in [203].

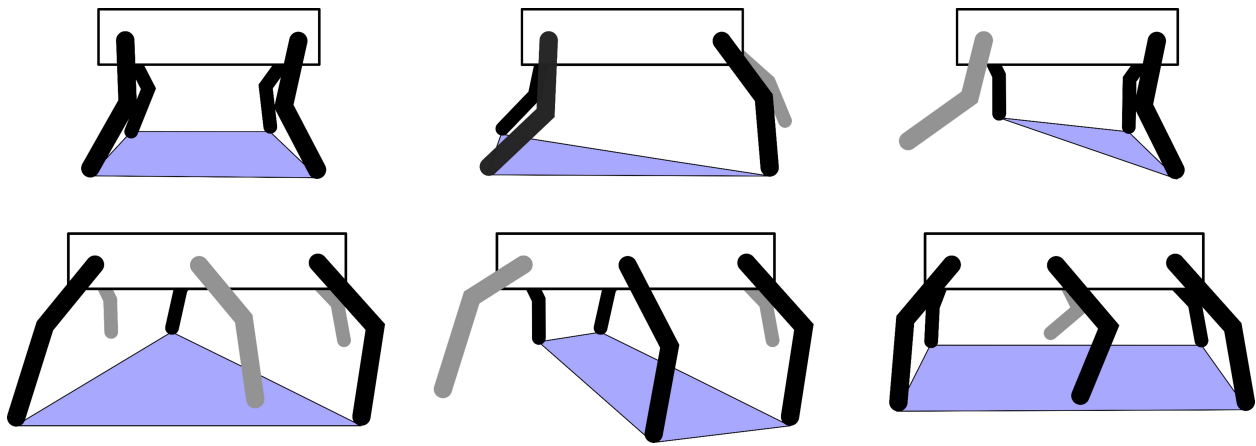


Bild 2.12.: Die *Aufstandsfläche* ist als konvexe Hülle aller Bodenkontakte definiert (schwarze Beine haben Bodenkontakt): Aufstandsflächen für eine vierbeinige Kinematik (obere Reihe), Aufstandsflächen für eine sechsbeinige Kinematik (untere Reihe).

Kinematik Die Kinematik eines Roboters beschreibt den geometrischen Zusammenhang zwischen den starren Segmenten und beweglichen Gelenken. Je nach Gelenkzahl sowie deren Winkel zueinander kann es schwierig sein, die Bewegungen der Kinematik nachzuvollziehen. Aus diesem Grund sind für Laufroboter zwei kinematische Berechnungen wichtig. Die direkte vorwärts Kinematik kann zu einer bekannten Gelenkwinkelkonfiguration die Position und Orientierung (Pose) der Fußspitze berechnen. Im Gegensatz dazu wird die inverse Kinematik verwendet um zu einer gewünschten Pose der Fußspitze die passenden Gelenkwinkel zu bestimmen. Diese Abbildung kann mehrdeutig sein bzw. möglicherweise gibt es auch keine Lösung, da die Zielpose nicht mit dem Roboterbein erreicht werden kann. Weitere Details zur Berechnung der direkten und inversen Kinematik findet sich in zahlreichen Standardwerken, wie z.B. dem *Springer Handbook of Robotics* [203].

2.5. Skalierungseffekte in der Natur

Geschwindigkeit Wenn die maximalen Laufgeschwindigkeiten von Tieren verglichen werden sollen, muss zunächst geklärt werden, ob die Leistung durch aerobes oder anaerobes Laufen erbracht wurde. Die insgesamt höchsten Geschwindigkeiten können beim anaeroben Laufen erreicht werden [8]. Jedoch ist die Leistung nur kurzfristig abrufbar und stellt ein Sonderfall der Lokomotion dar. Im Weiteren konzentriert sich diese Arbeit deshalb auf das normale aerobe Laufen, mit der regulären Verstoffwechslung von Sauerstoff zur Energiegewinnung. Wie in Abb. 2.13 zu sehen ist, sind die maximalen Laufgeschwindigkeiten bereits bei Säugetieren sehr unterschiedlich. Grundsätzlich lässt sich die Tendenz erkennen, dass größere Säugetiere schneller laufen können als kleinere Säugetiere. Sehr große Säugetiere, wie z.B. Nashörner fallen hingegen wieder aus dem Schema und laufen vergleichsweise langsam [8]. Zudem laufen Säugetiere mit einem ähnlichen Körpergewicht nicht unbedingt ähnlich schnell. Ein Bär ist z.B. deutlich langsamer als ein ähnlich schweres Pferd. Ein Tier oder Insektes kann die eigene Laufgeschwindigkeit steigern indem die Schrittfrequenz oder die *Schrittweite* erhöht werden. Säugetiere tendieren bei langsamen und mittleren Geschwindigkeiten dazu sowohl die Schrittfrequenz wie auch die *Schrittweite* anzupassen. Wechseln diese jedoch in ein anderes Laufmuster z.B. in den Galopp wird vor allem die *Schrittweite* vergrößert. Bei Insekten und Reptilien hingegen werden stets sowohl die Schrittfrequenz wie auch die *Schrittweite* erhöht um schneller laufen zu können.

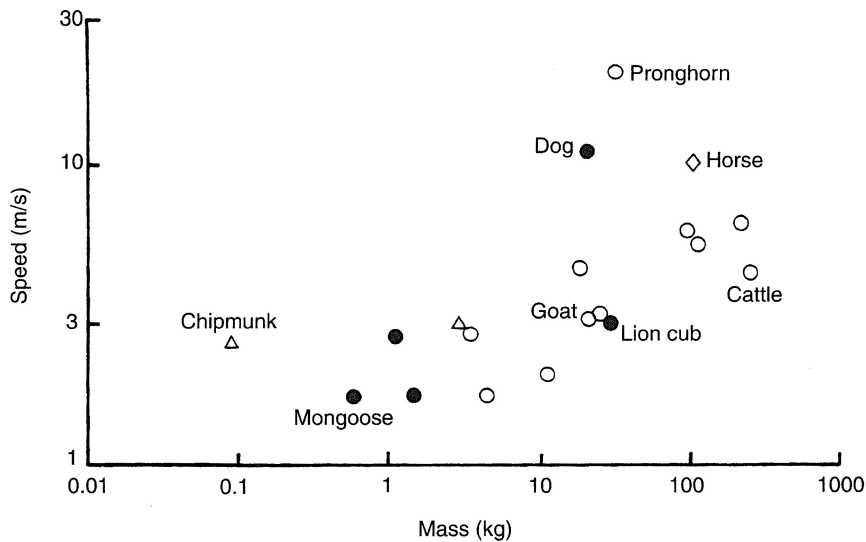


Bild 2.13.: Maximale Laufgeschwindigkeit von Säugetieren im Vergleich. Quelle [8]

Dynamische Ähnlichkeit und Froude Number *Alexander* zeigte als Erster, dass es einen artenunabhängigen Zusammenhang zwischen der Größe, *Schrittweite* sowie der Geschwindigkeit gibt [5]. Dieser Zusammenhang basiert auf dem Konzept der *dynamischen Ähnlichkeit*. Definition nach [7]: Zwei dynamische Systeme sind ähnlich, wenn (1) alle geometrische Längen mit einem konstanten Faktor, (2) alle Zeiten mit einem zweiten, konstanten Faktor und (3) alle Kräfte mit einem konstanten, dritten Faktor skaliert werden können. Das Konzept der *dynamischen Ähnlichkeit* kann auch auf die mehrbeinige Lokomotion übertragen werden. Die Hypothese ist, dass auch Tiere mit sehr unterschiedlichen Größen *dynamisch ähnlich* Laufen können. *Ducan* konnte in seiner Arbeit diese Hypothese belegen. [69]. Unterschiedliche Tierarten laufen dann *dynamisch ähnlich*, wenn die folgende Gleichung mit der Laufgeschwindigkeit V , Schulterhöhe h und Fallbeschleunigung g gilt:

$$\text{Froude Number} = \frac{V^2}{g \cdot h} \quad (2.5)$$

Anders formuliert laufen Tiere *dynamisch ähnlich*, wenn ihre Geschwindigkeit jeweils gleich proportional zur Quadratwurzel ihrer Schulterhöhe ist. Somit laufen Tiere mit der gleichen *Froude Number* unabhängig von ihrer Größe *dynamisch ähnlich*. Interessanterweise wechseln nahezu alle Säugetiere vom Laufen (*Dutyfactor* < 0,5) zum Rennen (*Dutyfactor* > 0,5) bei einer *Froude Number* von 0,5. Die *Froude Number* beschreibt also einen sehr grundlegenden, übergeordneten und skalierungsinvarianten Zusammenhang.

In der Abb. 2.14 ist die *Froude Number* für zahlreiche Säugetierarten bei verschiedenen Laufgeschwindigkeiten eingetragen. Die Geraden in dieser Abbildung zeigen, dass es viele Arten gibt, die *dynamisch ähnlich* laufen. Hierzu wurde jeweils die *Froude Number* gegenüber der relativen Schrittweite (relative Schrittweite = *Schrittweite* / Schulterhöhe) erfasst. Die unterschiedlichen Geraden repräsentieren unterschiedliche Säugetier-Kinematiken, die jeweils *dynamisch ähnlich* laufen (siehe auch Abschnitt 2.2). Zahlreiche weitere Quellen belegen, dass viele Tierarten trotz großer Unterschiede dynamische Ähnlichkeiten beim Laufen aufweisen [8].

Feder-Masse-Modell zur Modellierung der mehrbeinigen Lokomotion Bereits frühe Arbeiten von *Blickhan* haben den Bewegungsapparat mit Skelett und Muskeln als einfaches, biomechanisches Feder-Masse-Modell (Spring Loaded InvertedPendulum - SLIP) modelliert [34]. Die Muskeln und Sehnen spei-

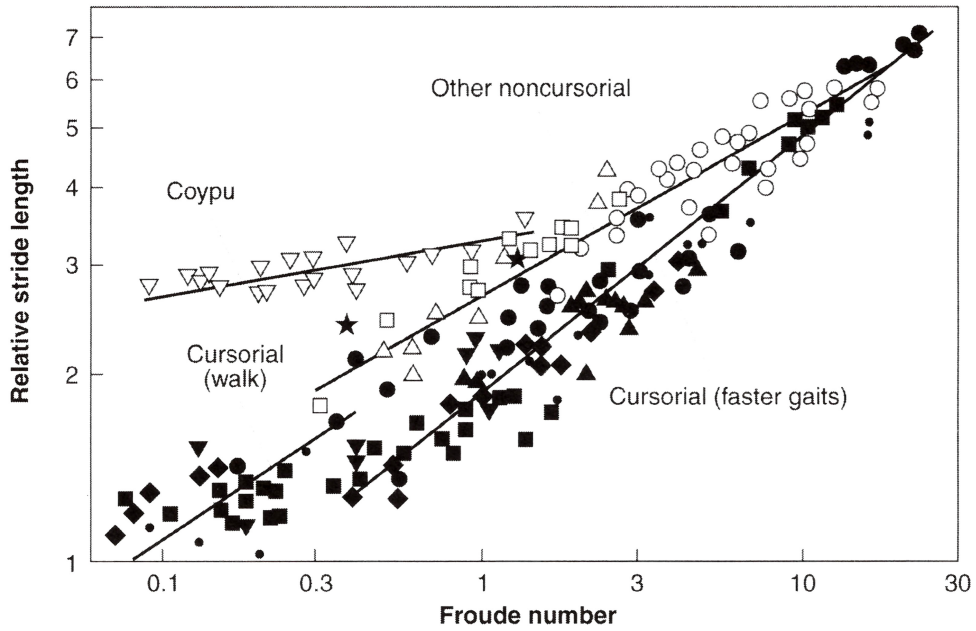


Bild 2.14.: Die *dynamische Ähnlichkeit* lässt sich anhand der Geraden bzw. dem Zusammenhang der *Froude Number* und der relativen *Schrittweite* (relative stride length) gut erkennen. Quelle [8]

chern beim Laufen Energie und geben diese später wie eine Feder wieder ab. Somit entsteht ein für die Lokomotion wichtiges, nachgiebiges Impedanzverhalten. In der Arbeit von *Farlay* wird untersucht wie sich die Federsteifigkeit für verschiedene Tierarten je nach Geschwindigkeit verändert [72]. Das einfache Feder-Masse-Modell betrachtet nur die Bewegung in vertikaler Richtung. Die Bewegung hängt von der Geschwin-

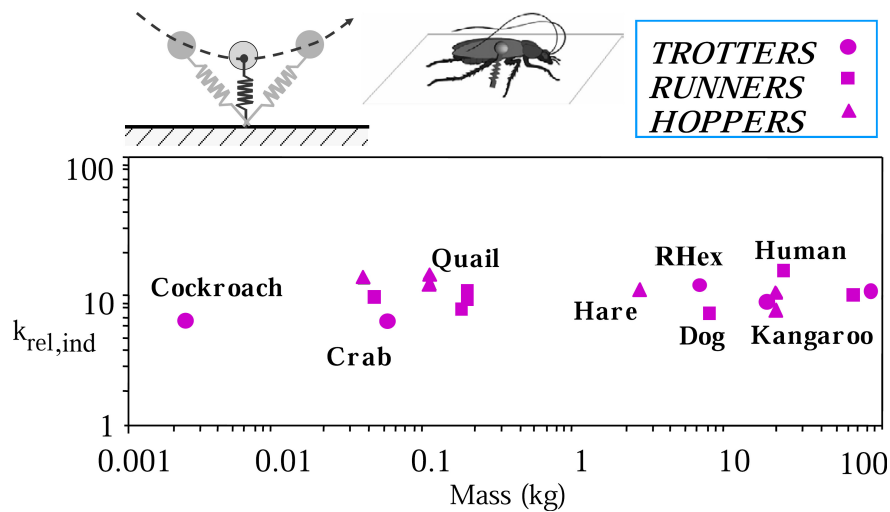


Bild 2.15.: Das einfache Feder-Masse-Modell zur Beschreibung der mehrbeinigen Lokomotion lässt sich skalierungs-invariant auf eine Vielzahl von Arten anwenden. Quelle [99]

digkeit, der Federsteifigkeit und dem Aufttrittswinkel bzw. überstrichenem Winkel ab. In Abbildung 2.15 zeigen *Full und Tu*, dass das Feder-Masse-Modell für eine Vielzahl von Arten Gültigkeit hat [75][99]. Die effektive Federsteifigkeit k kann aus dem Verhältnis der maximalen, vertikalen Bodenreaktionskraft F_{vert}

und der maximalen Stauchung der Beinlänge Δl bestimmt werden:

$$k = \frac{F_{vert}}{\Delta l} \quad (2.6)$$

Dabei beschreibt diese Federsteifigkeit k nicht die Steifigkeit eines Einzelbeins, sondern des Gesamtsystems und ist somit unabhängig von der Anzahl der Beine und deren Kinematik. Laut weiteren Untersuchungen ist die Federsteifigkeit des Feder-Masse-Systems bei Hunden, Ziegen sowie Pferden nahezu konstant auch für unterschiedliche Geschwindigkeiten [72]. Die Gültigkeit des einfachen Feder-Masse-Systems zur Modellierung der mehrbeinigen Lokomotion unterschiedlicher Tiere ist auch ein Beweis dafür, dass diese Tiere *dynamisch ähnlich* laufen. Dennoch gibt es zwischen den Arten auch zahlreiche Unterschiede. Laufen Tiere z.B. unterschiedlicher Gewichtsklassen mit der gleichen Geschwindigkeit, besitzen schwerere Tiere eine größere Federsteifigkeit und haben gleichzeitig einen höheren *Dutyfactor* [72]. Dies widerlegt jedoch nicht die Thesen des Feder-Masse-Modells oder der *dynamischen Ähnlichkeit*, sondern zeigt die Vielfalt an unterschiedlichen Lokomotionskonzepten.

Energieeffizienz Die Betrachtung der rein mechanischen *Cost of Transport* bei Tieren sowie Insekten lässt ausgehend von den Erkenntnissen zur *dynamischen Ähnlichkeit* eigentlich vermuten, dass die Energieeffizienz unabhängig von dem Gewicht sein müsste [9]. Messung des realen Sauerstoffverbrauchs und der daraus abgeleiteten *Metabolic Cost of Transport* widerlegen diese These jedoch. Es scheint unterschiedlich effiziente Lokomotionsformen zu geben. Dies könnte zum einen an der schwer zu erfassenden Energieeffizienz der Muskeln oder an Konzepten zur Energierückgewinnung liegen. Durch elastische Elemente wie

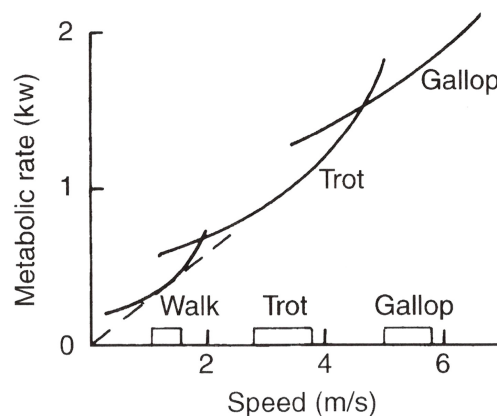


Bild 2.16.: Zusammenhang des Energieverbrauchs (Metabolic Rate) und der Laufgeschwindigkeit von speziell trainierten Pferden, die mit verschiedenen Geschwindigkeiten fest in einem Laufmuster laufen. Quelle [8]

der Achillessehne kann beim Laufen Energie zwischengespeichert werden. Beim Auftreten wird bis zu 35% der negativen Arbeit in der Sehne gespeichert und beim Abheben des Fußes wieder zurückgegeben [8]. Bei kleinen Säugetieren ist die Energieeffizienz beim Laufen deutlich schlechter, da die Sehnen und der Lokomotionsapparat insgesamt keine größere Energierückgewinnung ermöglichen.

Die Abb. 2.17 zeigt, dass die auf die Distanz normierte *Metabolic Cost of Transport* linear mit der Masse des Tieres, Insektes oder Reptils wächst [99]. Die Anzahl der Beine, die Beinkinematik, das Laufmuster, die Anordnung der Beine sowie viele weitere Unterschiede spielen nur eine untergeordnete Rolle bei der Lokomotionsenergie. Das ist ein weiterer Beleg für die Existenz von grundlegenden Mechanismen beim Laufen, die für alle Systeme gelten und somit auch einen unabhängigen Vergleich erlauben.

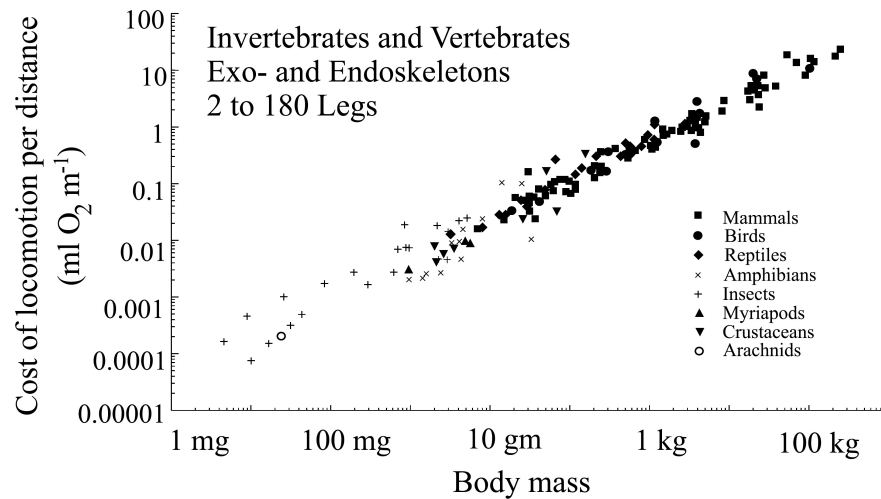


Bild 2.17.: Der normierte Energieverbrauch pro Distanz (Cost of locomotion per distance) im Verhältnis zum Körpergewicht (Body mass) zeigt einen spannenden artenübergreifenden und skalierungsinvarianten Zusammenhang bei der mehrbeinigen Lokomotion. Quelle [99]

Hoyt et. al haben Ponys so trainiert, dass diese unabhängig von der Geschwindigkeit mit einem bestimmten Laufmuster laufen können [100]. In der Abbildung 2.16 ist der Energieverbrauch (Metabolic Rate) gegenüber der Laufgeschwindigkeit aufgetragen. Weiter sind die Kurven in die drei Laufmuster Gang, Trab und Galopp unterteilt. Jedes der untersuchten Laufmuster hat eine unterschiedliche energieoptimale Laufgeschwindigkeit. An einigen Stellen überlappen die Laufmusterkurven. Die Laufmuster sind für gleiche Geschwindigkeiten unterschiedlich effizient. In der Natur und ohne das antrainierte Verhalten laufen Pferde mit deutlich kleineren Geschwindigkeitsbereichen pro Laufmuster (siehe unteren Teil der Abb. 2.16). Der Wechsel zwischen den Geschwindigkeiten erfolgt dort diskret. Das gleiche Verhalten wurde bereits bei vielen anderen Tieren beobachtet [8]. Weitere Untersuchungen belegen den zuvor nur vermuteten, proportionalen Zusammenhang der *Metabolic Cost of Transport (MCoT)* und der Masse des Tieres m sowie dessen aktuelle Laufgeschwindigkeit V :

$$MCoT = 10,7 \cdot m^{-0,32} + \frac{6,0 \cdot m^{-0,30}}{V} \quad (2.7)$$

Die Messdaten in Abb. 2.18 zeigen, dass die pro Strecke normierte *Metabolic Cost of Transport* für hohe Geschwindigkeiten mit dem Gewicht der Tiere abnimmt. Außerdem erreichen große Tiere eine höhere Energieeffizienz beim Laufen als kleine Tiere. Neben elastischen Elementen wie spezielle Sehnen könnten auch die Muskeln ein Grund für die Unterschiede in der Effizienz sein [9]. Dass die Muskeffizienz sich z.B. beim Laufen mit höheren Geschwindigkeiten verbessert, konnte bereits nachgewiesen werden. Neue Ergebnisse lassen vermuten, dass die Energieeffizienz bei kleinen, laufenden Tieren nicht so schlecht ist wie die Daten in der Abbildung 2.18 vermuten lassen [8]. Viele Biologen wünschen sich ergänzende Untersuchungen und Studien um die spannenden Skalierungseffekte der natürlichen, mehrbeinigen Lokomotion weiter untersuchen zu können.

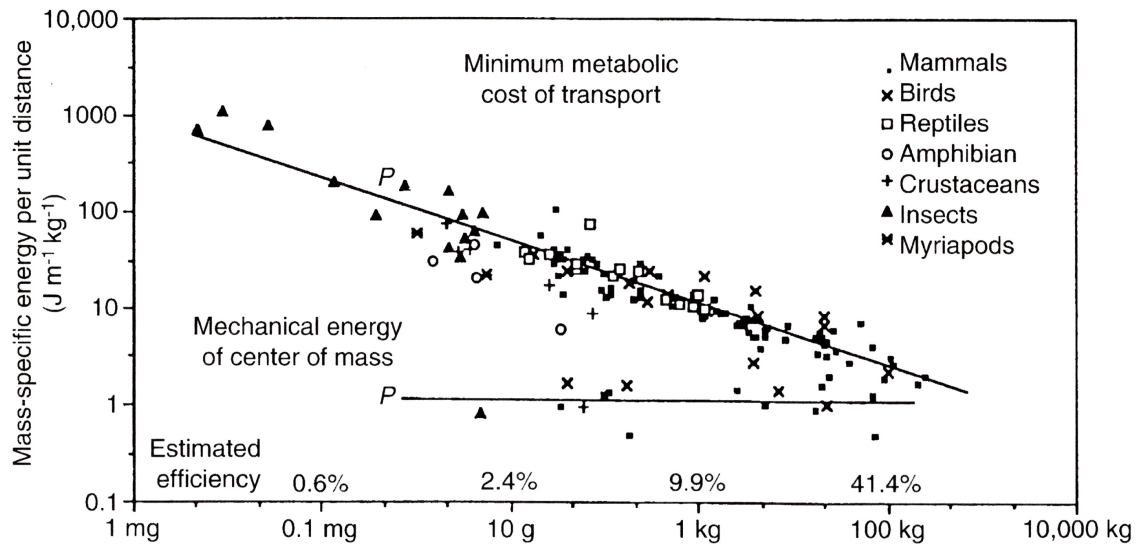


Bild 2.18.: Normierte Energieverbrauch pro Distanz für eine Vielzahl unterschiedlich schwerer Tiere, Insekten und Reptilien. Untere Kurve stellt die resultierende Energieeffizienz dar. Quelle [8]

3. Stand der Forschung im Bereich mehrbeiniger Laufroboter

Die Faszination für das technische Laufen ist bereits sehr alt. Überlieferungen aus der Antike zeigen, dass sich schon damals Menschen für mechanische Bewegungen mittels Beinen interessiert haben. Noch immer studieren viele Ingenieure und Forscher wie sich die raffinierten Ansätze aus der Natur technisch umsetzen lassen. Manchmal entstehen jedoch auch Ansätze, die keinen direkten natürlichen Vorbildern folgen, aber dennoch sehr natürliche Laufbewegungen erzeugen können (siehe z.B. RHex und DASH im Anhang in Abschnitt A.2). Das Kapitel wird mit einer kurzen Zusammenfassung der Geschichte der Laufroboterentwicklung eingeleitet. Anschließend werden mehrbeinige, moderne Laufroboter aus der ganzen Welt vorgestellt. Der Überblick der Systeme demonstriert die Vielfalt hinsichtlich der Kinematik, Steuerungsansätze aber auch die Motivation mehrbeinige Laufroboter zu entwickeln. Im anschließenden Abschnitt werden wichtige Arbeiten zur kinematischen Optimierung mehrbeiniger Laufroboter zusammengefasst und bewertet. Neben der Betrachtung der Kinematik werden auch wissenschaftliche Arbeiten zur Stabilitätsoptimierung untersucht. Weiter werden energetische Optimierungsansätze verglichen und diskutiert. Eine kurze Vorstellung des sechsbeinigen Laufroboters *LAURON*, der später auch intensiv für die Evaluation dieser Arbeit verwendet wird, erfolgt in einem gesonderten Abschnitt. Im vorletzten Abschnitt werden kurz aktuelle und potentielle Anwendungsszenarien für mehrbeinige Laufroboter beschrieben und bewertet. Abschließend werden die Übertragbarkeit sowie kritische Aspekte nochmals diskutiert und die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst.

3.1. Frühe Laufroboter

Der Blick in die Historie der Laufroboter zeigt, dass das Interesse am technischen Laufen schon bis in die Antike zurückreicht (siehe auch Anhang A). Auch wenn die Überlieferungen aus dieser Zeit eher spärlich sind, inspirierten diese frühen Entwicklungen spätere Erfinder wie *Leonardo da Vinci*. Um 1500 konzipierte *Leonardo Da Vinci* bereits komplexe mechanische Konstruktionen, die große Ähnlichkeit zu heutigen, modernen Laufrobotern aufweisen. Der hölzerne, mechanische Löwe aus dem Jahr 1515 ist hierfür ein gutes Beispiel [150]. Nach den beeindruckenden Erfindungen von *da Vinci* dauerte es jedoch viele Jahrhunderte bis weitere wegweisende Laufmaschinen-Entwicklungen stattfanden. Das neuartige, mechanische Antriebskonzept von *Tschebyschow* [139] (siehe links in Abbildung 3.1) aus dem Jahr 1850 bildete die Basis für das mechanische Pferd von *Rygg* [185] und viele weitere Laufroboter-Konzepte. Die fotografischen Bewegungsstudien von *Eadweard Mybridge* waren und sind auch noch heute eine wichtige Grundlage sowie Inspiration für biologisch-motivierte Laufroboter-Konzepte [152]. Diese zeitlich leicht versetzten Serienaufnahmen ermöglichten es die mehrbeinige Lokomotion von Tieren erstmals im Detail nachzuvollziehen. Moderne Laufroboter wurden nach dem Ende der beiden Weltkriege in den 1960er Jahren entwickelt.

Neben dem *GE Walking Truck* [151] von *Mosher*, war das *Phoney Pony* [144] einer der ersten modernen Laufroboter (siehe rechts in Abbildung 3.1). Der erste computergesteuerte, sechsbeinige Laufroboter war der *OSU Hexapod* [146], der die Basis für die spätere Entwicklung des beeindruckenden *Adaptive Suspension Vehicle* [223] bildete. Anfang der 1990er Jahre beschleunigte sich die Entwicklung der mehrbei-

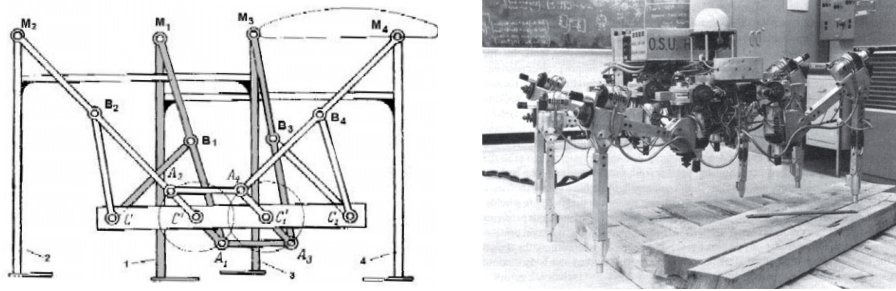


Bild 3.1.: (links) Antriebskonzept nach *Tschebyschow* aus dem Jahr 1850. Quelle [239], (rechts) Beim *OSU Hexapod* aus dem Jahr 1977 stand die Regelung der komplexen Kinematik im Fokus der Forschung. Quelle [211]

nigen Laufroboter immer weiter. In dieser Zeit entstanden auch der sehr bekannte Roboter *DANTE II* [157], der erfolgreich in einen Vulkankrater hinabstieg, oder *Genghis* [12], dessen verhaltensbasierte Subsumption Softwarearchitektur bereits einen hohen Grad an Autonomie ermöglichte. Der sechsbeinige Laufroboter *LAURON* wurde ebenfalls in dieser Zeit am FZI Forschungszentrum Informatik in Karlsruhe entwickelt [Roennau et al., 2010b]. Der Fokus bei dieser ersten *LAURON* Generation lag auf maschinellen Lernverfahren für Bewegungstrajektorien. Die Geschichte der Laufroboter ist zwar bereits über 2000 Jahre alt, als internationales Forschungsfeld hat sich die Entwicklung von Laufrobotern jedoch erst Anfang der 1990 wirklich etabliert. Somit ist die Forschung im Feld mehrbeiniger Laufroboter noch vergleichsweise jung und es sind noch viele, weitere Innovationen zu erwarten.

3.2. Vielfalt moderner Laufroboter

Mehrbeinige Laufroboter unterscheiden sich stärker als ihre natürlichen Vorbilder, da die Antriebstechnologien, die Steuerungskonzepte und viele weitere Faktoren z.T. grundlegend verschieden sind. Einen großen Überblick der beachtlichen Vielfalt kann der Abbildung 3.2 entnommen werden. Die dort abgebildeten Laufroboter werden im Anhang A mit ihren Eigenheiten detailliert vorgestellt. An dieser Stelle sollen Klassen für diese mehrbeinigen Roboter entwickelt werden. Der sechsbeinige Laufroboter *SILO6* ist ein typischer Vertreter der biologisch-inspirierten, insektenartigen, sechsbeinigen Laufrobotersysteme. Weitere Beispiele für diese statisch stabil laufende Klasse wären *AMOS-WD06*, *Hexabot* und auch *LAURON IVc*. Die Systeme zeichnen sich vor allem durch ihre sechs Beine mit jeweils drei Gelenken pro Bein aus. Diese insektenartigen Laufroboter haben eine große Aufstandsfläche und können nur statisch stabil laufen. Dies ist die häufigste Art von mehrbeinigen Laufrobotern, da sie eine hohe Robustheit, einfache Kinematik und gleichzeitig gute Geländegängigkeit aufweist. Eine Erweiterung dieser Klasse stellen die Laufroboter *SpaceClimber*, *LEMURIIa*, aber auch *LAURON V* dar. Diese statisch stabil laufenden, sechsbeinigen Robotersysteme besitzen mehr als drei Gelenke pro Bein und können bereits einfache Manipulationsaufgaben mit ihren Beinen durchführen. Im Bereich der sechsbeinigen Laufroboter gibt es noch die Klasse der dynamisch laufenden Roboter. Hierzu zählen Systeme wie *RHex* oder auch *DASH*. Diese Roboter besitzen nur sehr wenige Freiheitsgrade pro Bein (meist nur ein DOF). Dennoch erreichen sie von allen mehrbeinigen Laufrobotern die höchsten, relativen Geschwindigkeiten. Auch wenn das Lokomotionskonzept z.B. bei *RHex* auf sechs einfach rotierenden Elektromotoren basiert, besitzt die sich einstellende Lokomotion große Ähnlichkeiten mit dem Laufverhalten schneller Insekten wie der Kakerlake. An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass es weitere ungewöhnliche Laufroboter-Konzepte gibt, die entweder einer der genannten Klassen zugeordnet werden können oder einen Spezialfall darstellen, für den an dieser Stelle keine eigene

| Laufroboterklassen (mehrbeinig) | | | | | Beispiele |
|---------------------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|---------|--|
| 6 Beine | insektenartige Kinematik | statisch stabil | ≤ 3 Gelenke pro Bein | langsam | AMOS-WD06 SILO6 Hexabot Katharina LAURON IVc |
| 6 Beine | insektenartige Kinematik | statisch stabil | ≥ 4 Gelenke pro Bein | langsam | SpaceClimber LEMURIIa LAURON V |
| 6 Beine | einfache Kinematik | dynamisch stabil | wenige Gelenke pro Bein | schnell | RHex DASH |
| 4 Beine | reptilienartige Kinematik | statisch stabil | 3 Gelenke pro Bein | langsam | TITAN VIII Pleurobot |
| 4 Beine | säugetierartige Kinematik | dynamisch stabil | ≥ 2 Gelenke pro Bein | schnell | SpotMini BigDog ANYmal MIT Cheetah HyQ |

Tabelle 3.1.: Klassen mehrbeiniger Laufroboter mit Beispielen aus denen im Anhang A detailliert vorgestellten Laufrobotern.

Klasse erstellt werden soll. Beispiele hierfür sind extrem modulare Laufroboterkonzepte wie der *Snapbot* oder *Snake Monster*. Im Bereich der vierbeinigen Laufroboter gibt es die Klasse der statisch stabil laufenden Systeme. Hierzu zählen sehr erfolgreiche Roboter wie *TITAN VIII* oder *Pleurobot*. Die aktuell populärste Klasse besteht aus vierbeinigen, dynamisch laufenden Roboter wie *ANYmal*, *Boston Dynamics Spot*, *MIT Cheetah* oder auch *HyQ*. Diese Systeme beeindrucken mit ihrer Laufleistung hinsichtlich Geschwindigkeit, Robustheit sowie Geländegängigkeit. Insbesondere die letzte Klasse hat in jüngster Zeit beeindruckende Entwicklungen gezeigt. Auch wenn sich die Systeme stark unterscheiden, gibt es dennoch einige, grundlegende Gemeinsamkeiten. In dieser Arbeit soll vor allem ein Beitrag dazu geleistet werden diese roboterunabhängigen Gemeinsamkeiten zu identifizieren und es zu ermöglichen Erfahrungen und *Best Practices* auf viele andere Robotersysteme zu übertragen.

3.3. Kinematische Optimierung mehrbeiniger Laufroboter aus der Literatur

Die Kinematik eines Laufroboters bestimmt maßgeblich die späteren Eigenschaften sowie die Leistungsfähigkeit des Systems. Nicht nur die Beinkinematik, sondern auch die Anbringung der Beine am Zentralkörper hat einen Einfluss auf die Schrittweiten und Schritthöhen. Gerade bei der Konzeption neuer, mehrbeiniger Laufroboter sollten die biologischen Vorbilder genau studiert werden. In diesem Abschnitt werden vor allem Arbeiten aus dem Bereich der kinematischen Optimierung vorgestellt. Außerdem wird untersucht, wie gut die Ansätze auf andere Systeme übertragen werden können.

Intelligenz in der Mechanik, Morphologie und Materialien

Mehrbeinige Laufroboter interagieren während der Lokomotion kontinuierlich mit der Umgebung. Das Laufen besteht aus wiederkehrenden, zyklischen Bewegungen, die von vielen Faktoren wie der Laufgeschwindigkeit, aber auch der Bodenbeschaffenheit abhängen. Bei der Optimierung, aber auch Konzeption neuer Laufroboter sollte die Interaktion der Laufroboter-Steuerung mit der Mechanik, Kinematik aber auch dem

3. Stand der Forschung im Bereich mehrbeiniger Laufroboter

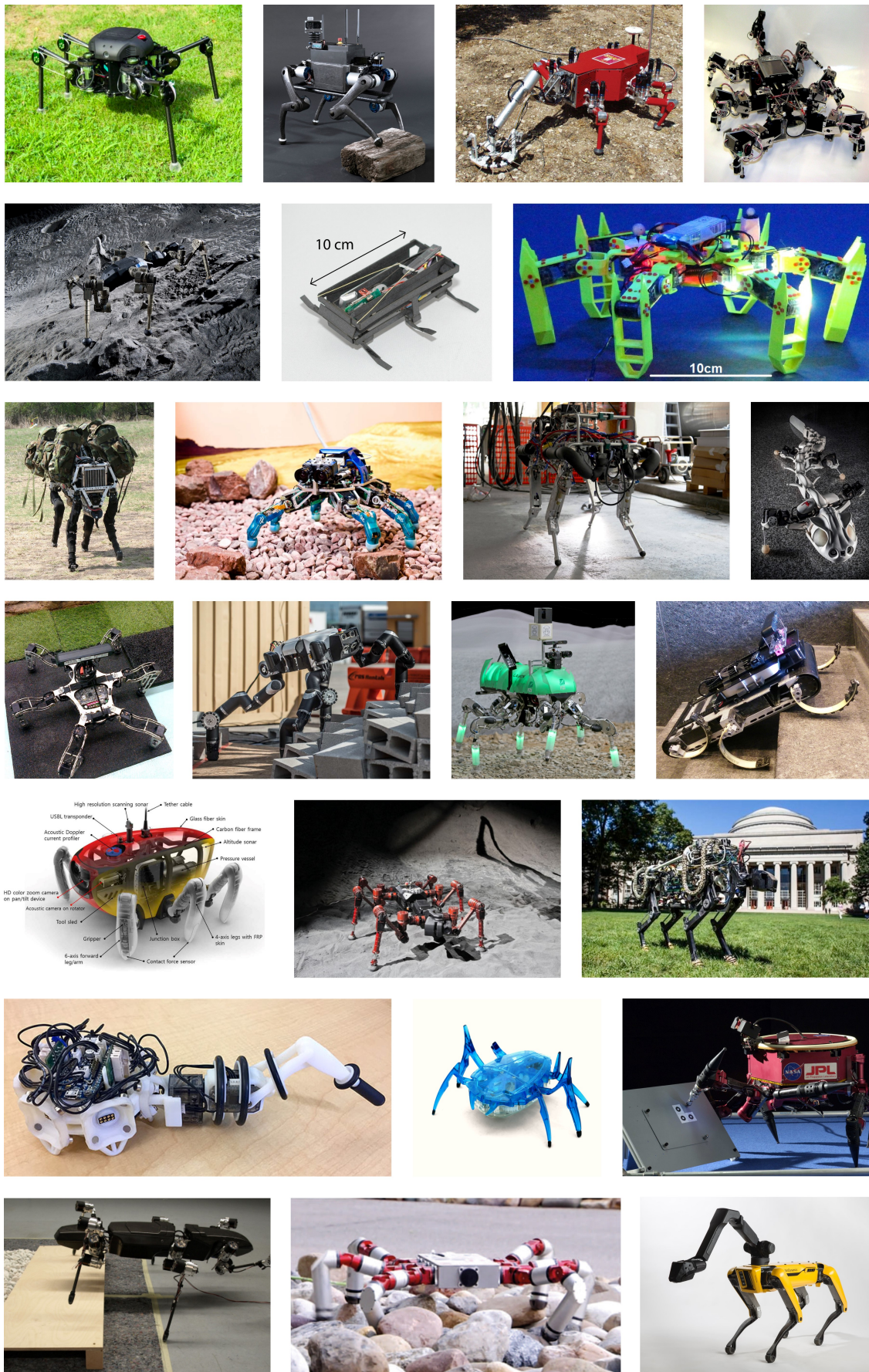


Bild 3.2.: Die Vielfalt mehrbeiniger Laufroboter ist faszinierend groß: von links oben nach rechts unten mit Bildquellen: *TITAN XIII*[126], *ANYmal*[104], *SILO6*[60], *AMOS-WD06*[142]; *SpaceClimber*[18], *DASH*[31], *Hexabot* [70]; *BigDog*[36], *DLR-Klabber*, [86], *HyQ*[199], *Pleurobot*[118]; *Messor II*[17], *RoboSimian*[92], *LAURON*, *RHex*[225]; *Crabster CR200*[114], *CREX*[180], *MIT Cheetah 2*[71]; *Snapbot*[123], *Hexbugs*, *LE-MURII*[153]; *HECTOR*[167], *Snake Monster*[215], *SpotMini*[39].

Untergrund stets als Ganzes betrachtet werden. *Rolf Pfeifer et al.* belegen den starken Zusammenhang zwischen den Materialeigenschaften, der Morphologie und der Laufleistung [169]. Während der Lokomotion entstehen selbststabilisierende Zyklen, die auch als Eigenschwingungen der Dynamik des Systems bezeichnet werden können. Die Zyklen werden durch die Anordnung der Gelenke sowie die verwendeten Materialeigenschaften maßgeblich beeinflusst. In der Arbeit von *Blickhahn et. al* wird dieses Konzept *Intelligenz durch Mechanik* bezeichnet [35]. Dabei modellieren die Autoren vor allem ein Feder-Masse-Modell zur Beschreibung der selbststabilisierenden, zyklischen Bewegungen (siehe SLIP-Modell (Spring-Loaded Inverted Pendulum) [33]). *Pfeifer et al.* motivieren dazu diese intrinsischen Zyklen in mehrbeinigen Laufrobotern aktiv zu nutzen um effiziente, schnelle Systeme mit einfachen Steuerungen zu entwickeln. Vielmehr versuchen *Pfeifer et al.* ein Bewusstsein dafür zu schaffen, dass die Robotersteuerung als Teil der Mechatronik und Kinematik verstanden werden muss (*Embodiment*). In der Natur fand die Optimierung der Lokomotion auch immer im Zusammenspiel mit der Morphologie, den Muskeln, dem Nervensystem und kognitiven Fähigkeiten statt. In einem anschaulichen Experiment belegen *Iida et al.*, dass sich ein stabiles Laufmuster aus der Mechanik heraus entwickeln kann und prägen hierfür den Begriff *Emergenz* [108]. Links in der Abbildung 3.3 ist die einfache, vierbeinige Roboterplattform dargestellt, die für die Experimente verwendet wurde. Oben links ist der Hardwareaufbau mit den vier Servomotoren und einer einfachen Steuerplatine zu erkennen. Unten links ist das dynamische Modell des Roboters skizziert. Jedes Bein besitzt einen Motor und besteht aus zwei Elementen, die mit einer Feder miteinander verbunden sind. Der Roboter wird durch zwei einfache Sinusfunktionen angesteuert mit den Zielwinkel P_{vorne} und P_{hinten} .

$$P_{vorne} = A_{vorne} \cdot \sin(\omega t) + B_{vorne} \quad (3.1)$$

$$P_{hinten} = A_{hinten} \cdot \sin(\omega t + \phi) + B_{hinten} \quad (3.2)$$

Die beiden vorderen Beine werden synchron angesteuert. Die beiden hinteren Beine werden ebenfalls von einer Sinusfunktion, jedoch mit anderen Parametern und einer Phasenverschiebung ϕ , synchron angesteuert. Die Parameter A und B werden verwendet um die Amplitude sowie den Offset einzustellen. In allen Experimenten wurden die Parameter wie folgt angenommen: $A_{vorne} = A_{hinten} = 25^\circ$, $B_{vorne} = 20^\circ$ und $B_{hinten} = 10^\circ$. Veränderlich sind somit nur die Frequenz $1/\omega$ und die Phasenverschiebung ϕ . *Iida et al.* konnten für verschiedene Frequenzen und Phasenverschiebung zeigen, dass sich zwei stabile Laufmuster von ganz alleine einstellen. Diese Laufmuster erzeugen sogar hohe Laufgeschwindigkeiten von bis zu 50 cm/s ohne jegliches Sensorfeedback. Bei einer festen Phasenverschiebung $\phi = 0,1$ und mit einer Startfrequenz von 2,5 Hz hängt die Laufgeschwindigkeit linear von der Frequenz ab. Unterhalb von 2,5 Hz stellt sich keine stabile Laufbewegung ein. Der Ansatz zeigt, dass das Laufmuster intrinsisch in der Kinematik angelegt ist. Die beiden identifizierten Laufmuster erzeugen selbststabilisierende Zyklen wie man rechts in Abbildung 3.3 gut erkennen kann. Bei Störungen oder Änderung der Phasenverschiebung springt das Laufmuster von einem stabilen Zyklus zu dem anderen. Die Konzepte *Embodiment* und *Emergenz* können auf alle mehrbeinige Laufroboter übertragen werden. Allerdings lassen die Autoren offen wie die selbststabilisierenden Zyklen, die in der Morphologie des Systems angelegt sind, gefunden werden können. Insbesondere bei komplexen Laufrobotern mit vielen Freiheitsgraden fehlen noch Methoden um diese Ansätze nutzen zu können.

Kinematische Optimierung mittels evolutionärer Algorithmen

Mehrbeinige Laufroboter besitzen eine komplexe, kinematische Struktur mit vielen Freiheitsgraden. Neben

3. Stand der Forschung im Bereich mehrbeiniger Laufroboter

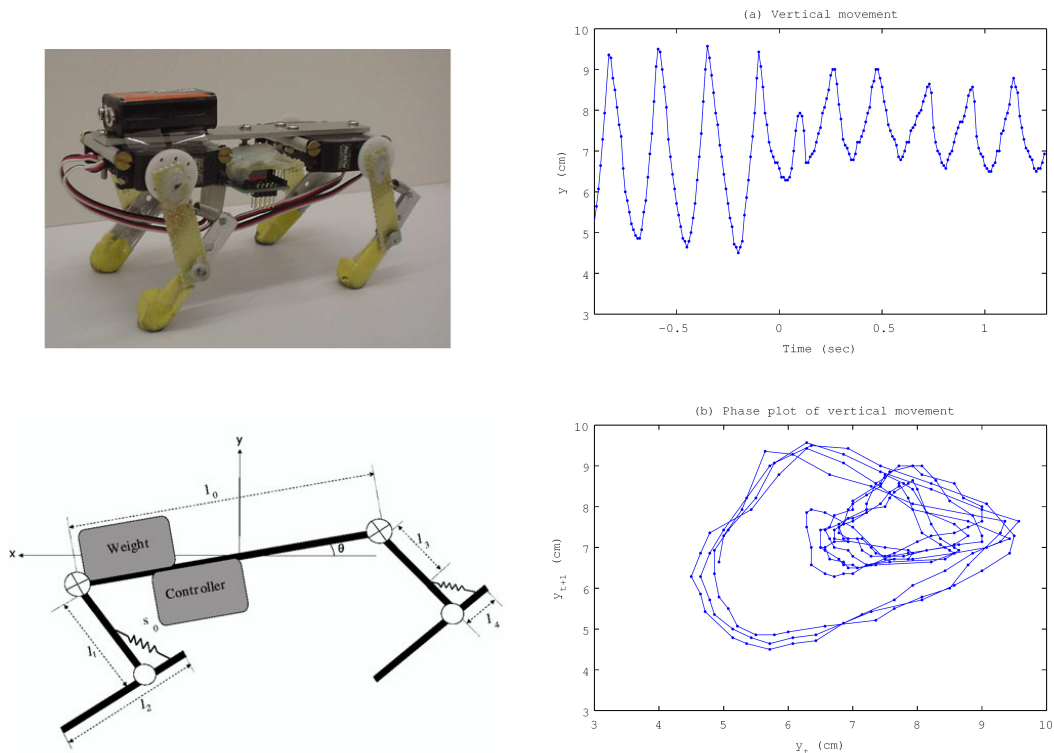


Bild 3.3.: (links) Einfacher Laufroboter mit jeweils einem Motor und einem weiteren passiven Gelenk pro Bein. Quelle [108]; (rechts) Selbststabilisierende Zyklen anhand der Bewegung des Zentralkörpers entlang der Y-Achse dargestellt; (rechts oben) die Veränderung der Amplitude und Frequenz der Lokomotion sind gut zu erkennen; (rechts unten) Phasendiagramm zeigt deutlich die zwei selbststabilisierenden Zyklen. Quelle [108]

der Anzahl sowie Position der Gelenke sind auch Segmentlängen und viele weitere Parameter zu wählen. Der Einsatz von evolutionären Algorithmen bietet die Chance alle Parameter gleichzeitig zu optimieren, selbst wenn nicht alle Zusammenhänge bzw. Abhängigkeiten bekannt sind. *Bartsch et al.* beschreiben in ihrer Arbeit den evolutionären Entwurf der Kinematik des *SpaceClimber* mittels des *CMA-ES*-Ansatzes (*Covariance Matrix Adaption - Evolution Strategy: CMA-ES*) [19][182]. Ziel war es mit diesem evolutionären Verfahren auch mit kleinen Populationszahlen gute Ergebnisse für die Optimierung der 17 kinematischen Parameter zu erhalten. Hierfür musste zunächst ein parametrisches Modell der Kinematik entwickelt werden, welches in der Simulationsumgebung verwendet werden konnte. Jedes Individuum, ein konkretes Laufrobotermodell mit eigenem Parametersatz, wurde jeweils in drei simulierten Versuchen bewertet. Zunächst musste das System 30 Sekunden lang auf einer Ebene laufen. Danach 10 Sekunden lang eine 30° Steigung hinauf und eine 30° Steigung hinab laufen. Die Leistungsfähigkeit des Laufrobotermodells wurde anhand einer Fitnessfunktion bewertet. Diese Fitnessfunktion betrachtet die Energieeffizienz, die Belastung der Gelenke sowie die Stabilität des Roboters. Insgesamt wurde über 250.000 verschiedene Kinematiken erzeugt, bewertet und in Klassen eingeteilt. Der Verlauf einer solchen evolutionären Optimierung kann anhand des durchschnittlichen Fitnesswerts links in Abbildung 3.4 gut nachvollzogen werden. Aus der insgesamt am besten bewerteten Klasse wurde die finale Laufroboter-Kinematik des *SpaceClimber* abgeleitet (siehe rechts in Abbildung 3.4). Weitere Details zum Roboter *SpaceClimber* wurden im Anhang A zusammengetragen. Die entwickelten Methoden können auf andere Robotersysteme übertragen werden, benötigen jedoch stets eine Simulationsumgebung zur Bewertung der Kinematiken. Ein wichtiger Vorteil des Ansatzes ist die Kombinierbarkeit verschiedener Ziele wie die Stabilität und Geschwindigkeit über die Fitnessfunktion.

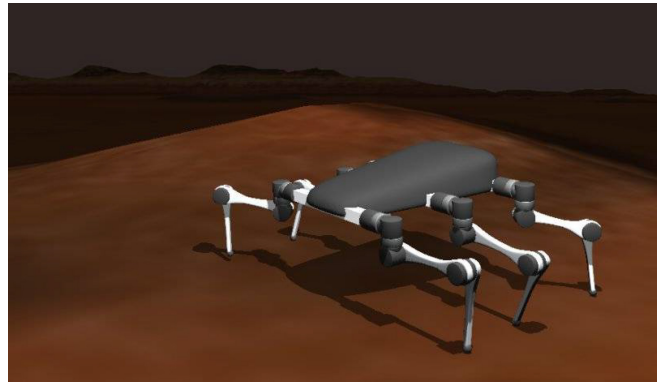
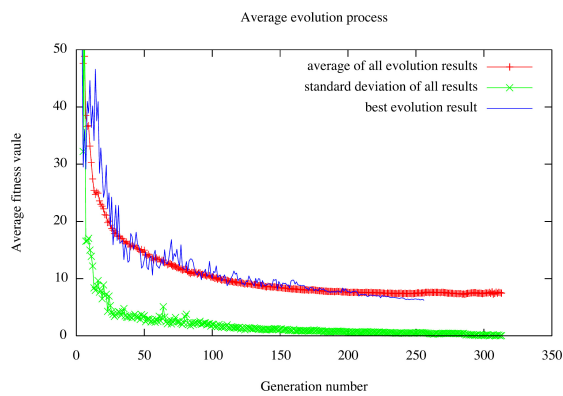


Bild 3.4.: (links) Verlauf der Fitnessfunktion des evolutionären Algorithmus mittels *CMA-ES* für die Entwicklung der *SpaceClimber* Kinematik. Quelle [182]; (rechts) finale *SpaceClimber* Kinematik nach der evolutionären Optimierung. Quelle [182]

Arbeitsraumoptimierung für Laufroboterbeine

Die Beine sind das wichtigste, mechatronische Element eines mehrbeinigen Laufroboters. Die Anzahl, Anordnung und maximalen Drehmomente der Gelenke bestimmen maßgeblich die Eigenschaften sowie Leistungsfähigkeit des Systems. Die Arbeitsräume der Beine entscheiden über die *Schrittweiten* und *Schritthöhen*, die der Roboter erreichen kann. *Görner et al.* waren bei der Entwicklung des DLR-Krabblers mit der Herausforderung konfrontiert nur sehr kleine Arbeitsräume pro Bein zur Verfügung zu haben [86][85]. Detaillierte Arbeitsraumanalysen bildeten die Basis für eine Optimierung der Beinpositionen und Anstellwinkel am Zentralkörper. So konnte ein kleiner, sechsbeiniger Roboter entwickelt werden, der dennoch in der Lage ist schwierige Hindernisse zu überwinden. Um die Arbeitsräume optimal nutzen zu können, wurde systematisch ausgewertet wann die Fußspitze eine virtuelle, horizontale Prüfebene erreichen kann. Dabei zeigte sich, dass die Fläche dieser Ebene größer wird, wenn der Arbeitsraum entlang der *ROLL*-Achse leicht angestellt wird. Allerdings reduziert diese Anstellung die maximale *Schritthöhe*. In weiteren Analysen untersuchen *Görner et al.* in welchen Bereichen des Arbeitsraums die höchsten, potentiellen Gelenkwinkelgeschwindigkeiten liegen. Hierzu verwendeten sie die sogenannte Manipulierbarkeit nach *Yoshikawa* [235]. Interessanterweise verbessert sich bei der Anstellung der Arbeitsräume auch die Gelenkwinkelgeschwindigkeiten im relevanten Teil des Arbeitsraums. In der Abbildung 3.5 sind die Arbeitsräume des *DLR-Krabbler* von oben mit einem *ROLL*-Anstellwinkel von 15° dargestellt. Neben dem *ROLL*-Anstellwinkel wurde auch der *YAW*-Anstellwinkel ($+40^\circ$ und -40°) der vorderen und hinteren Beine angepasst um die *Schrittweiten* zu maximieren. Die entwickelte Arbeitsraumanalyse kann auf viele verschiedene Beinkinematiken übertragen werden. In der vorliegenden Arbeit konzentriert sich die Optimierung vor allem auf die *Schrittweiten* und *Schritthöhen* aufgrund der kleinen Arbeitsräume der verwendeten Beinkinematiken.

Biologisch motivierte Entwicklung von Roboterkinematiken

Die Natur bietet eine große Anzahl und Vielfalt an Vorbildern für mehrbeinige Laufroboter. Viele der im Anhang A beschriebenen Systeme folgen in ihrer Kinematik diesen Vorbildern. In der Regel versuchen Forscher und Entwickler jedoch nur grundlegende Zusammenhänge zu übernehmen und nicht die Kinematik direkt zu kopieren. Einige, wenige Laufroboter werden jedoch genau mit diesem Ziel, ein biologisches Vorbild möglichst exakt abzubilden, entwickelt. Hieraus ergeben sich vor allem für Neurowissenschaftler sowie Biologen interessante Möglichkeiten natürliche Zusammenhänge, Verhalten oder Funktionen zu untersuchen und nachzubilden. Die Entwicklung künstlicher Neuronaler Netze, die die Beinbewegungen oder

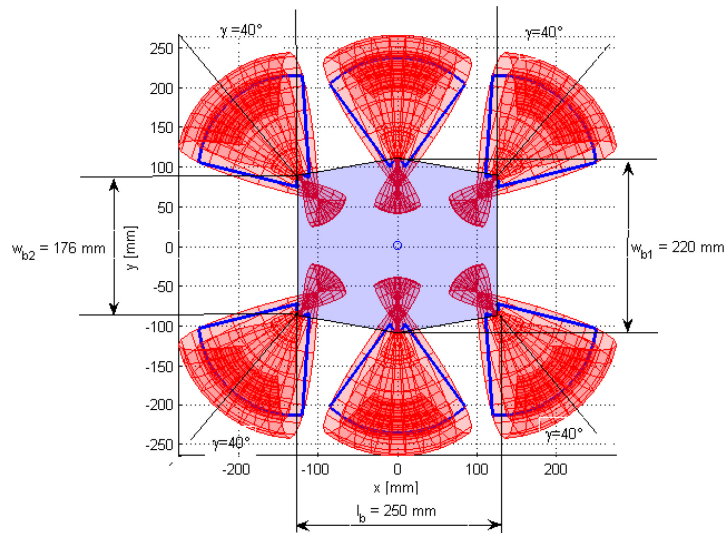


Bild 3.5.: Arbeitsraumoptimierung für den sechsbeinigen Laufroboter *DLR-Krabbler*. Quelle [86]

Laufmusterkoordination anhand von neurowissenschaftlichen Untersuchungen erzeugen, werden in solchen Robotersystemen ebenfalls erprobt und evaluiert.

Schneider et al. konzentrierten sich in ihrer Arbeit auf die möglichst exakte Nachbildung der indischen Stabheuschrecke (*Carausius morosus*) mit dem Laufroboter *HECTOR* [193]. Die Kinematik der Stabheuschrecke wurden in zahlreichen Arbeiten intensiv untersucht [52] und dann um den Faktor 20 bei der Entwicklung von *HECTOR* skaliert. Die Beinanordnung, die Segmentlängen und der Zentralkörper wurden exakt skaliert um möglichst genau dem biologischen Vorbild zu folgen. Eine Besonderheit von *HECTOR* sind die aktiven Freiheitsgrade innerhalb des Zentralkörpers. Das vordere Segment des Körpers (Prothorax) ist über zwei aktive Gelenke mit dem mittleren Segment (Mesothorax) und dieses wiederum über zwei aktive Gelenke mit dem hinteren Segment (Metathorax) verbunden. Um auch die Nachgiebigkeit der natürlichen Stabheuschreckenbeine nachbilden zu können, wurden spezielle, elastische Antriebssysteme für *HECTOR* entwickelt. Weitere Details zum Laufroboter *HECTOR* werden im Anhang A beschrieben. Ziel der Entwicklung war es neurowissenschaftlich die kognitiven Fähigkeiten beim mehrbeinigen Laufen untersuchen zu können. Hierfür soll z.B. das WALKNET weiterentwickelt und mit *HECTOR* evaluiert werden [57]. Der komplexe Fuß der Stabheuschrecke (Tarsus) und der Hinterleib (Abdomen) wurden beim Laufroboter *HECTOR* nicht nachgebildet. Dennoch kann das System verwendet werden um z.B. neurowissenschaftlich abgeleitete Koordinationsregeln für Laufmuster wie z.B. die *Cruse Regeln* zu entwickeln, die problemlos auf eine Vielzahl anderer Roboter übertragen werden können [54].

Karakasiliotis et al. versuchen ebenfalls ein natürliches Vorbild, den Salamander (*Pleurodeles waltl*), möglichst genau nachzubilden [118]. Der Salamander eignet sich gut als Vorbild, da dieser zum einen gut erforscht ist [109][184][117]. Zum anderen handelt es sich bei dem Salamander um ein aus neurowissenschaftlicher Sicht einfacheres Tier, das beim Laufen und Schwimmen nur selten dynamisches Verhalten zeigt. Ziel war es einen neuen, vierbeinigen Roboter zu entwickeln, der von seinem dynamischen Verhalten dem Salamander möglichst nahekommt. Hierzu wurden zunächst CT-Aufnahmen von laufenden Salamandern systematisch ausgewertet. In einem zweiten Schritt wurde ein kinematisches Modell anhand dieser Daten erstellt, das die realen Bewegungen möglichst gut nachbilden kann. Hierfür wurden maschinelle Lernverfahren bzw. ein genetischer Algorithmus verwendet um diese Unterschiede zu minimieren. Als Ergebnis besitzt *Pleurobot* ein kinematisches Modell mit insgesamt 27 Freiheitsgrade (11 DOF in der Wirbel-

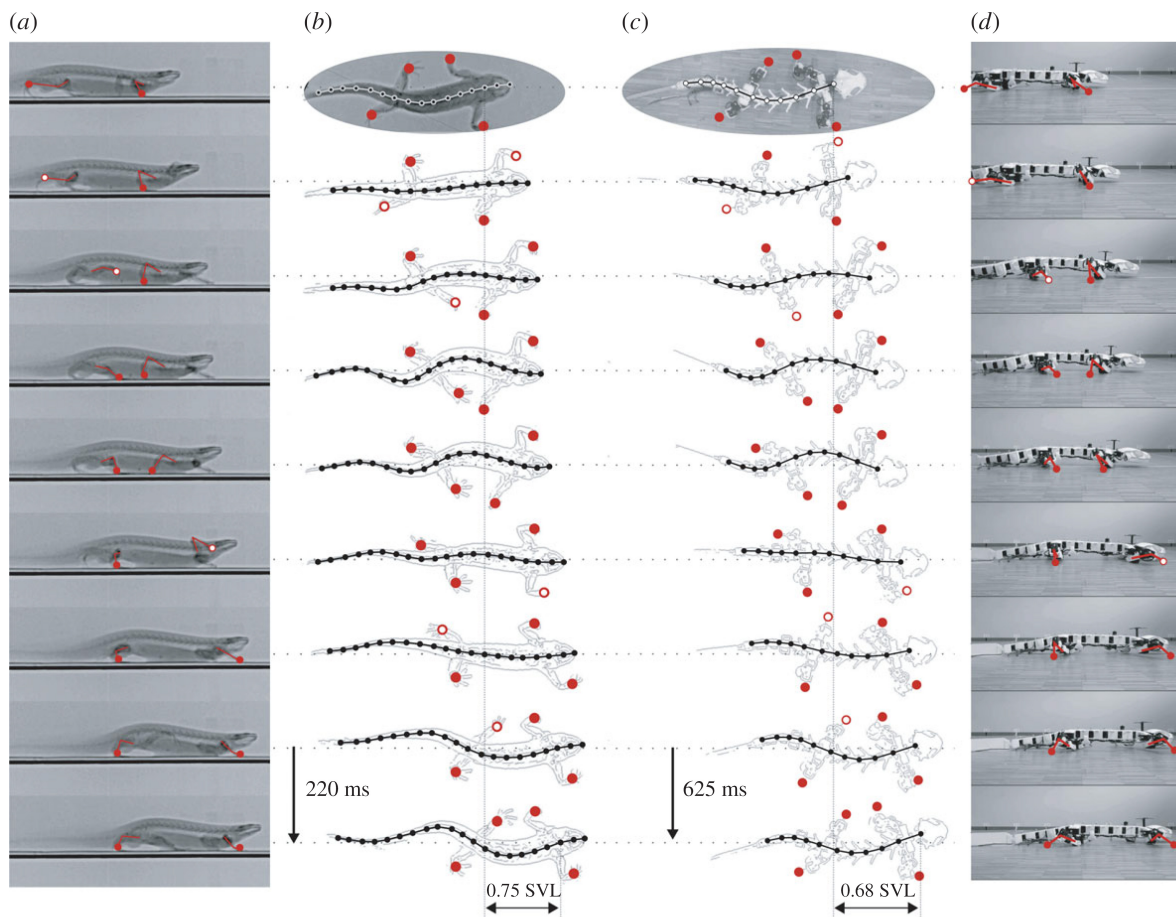


Bild 3.6.: Dynamisch ähnliche Lokomotion des *Pleurobot*: Bei der Entwicklung des *Pleurobot* wurde die Kinematik anhand von CT-Aufnahmen und einem genetischen Optimierer dem Salamander nachempfunden. Weiter wurde eine dynamische Skalierung vorgenommen um eine möglichst gute Übereinstimmung bei der Lokomotion zu erreichen. (links) Originalaufnahmen des Salamander bei der Lokomotion (a) seitlich, (b) von oben. (rechts) Bewegungen des Roboters durch Abspielen der gleichen Gelenkwinkelfolgen des Salamanders. (c) von oben, (d) seitlich. Quelle [118]

säule, 4 DOF pro Bein). Jetzt musste die fertige kinematische Struktur noch entsprechend skaliert werden um einen realen Roboter entwickeln zu können. Hierfür wurde zunächst ein leistungsstarker Servomotor ausgewählt anhand dessen die Größe das gesamte System ermittelt werden konnte. Als Skalierungsfaktor wurde der Faktor 8,6 ermittelt. Um die dynamische Ähnlichkeit beim Laufen zu erreichen wurde die *Froude Number* (siehe Abschnitt 2.5) des Salamanders bestimmt und die Geschwindigkeiten sowie Frequenzen des *Pleurobot* so angepasst, dass dieser die gleiche *Froude Number* wie sein Vorbild erreicht. Durch die dynamische Skalierung sehen die Bodenreaktionskräfte des *Pleurobot* den Messdaten von realen Experimenten mit Salamandern sehr ähnlich. Weiter ist es durch die kinematische und dynamische Ähnlichkeit möglich zuvor aufgenommene, natürliche Gelenkwinkelfolgen direkt auf dem *Pleurobot* abzuspielen. In der Abbildung 3.6 sind auf der linken Seite Bewegungen des Salamanders seitlich (a) und von oben (b) dargestellt. Rechts in der gleichen Abbildung sind entsprechende Aufnahmen des *Pleurobot* zu sehen, die anhand der gleichen Gelenkwinkelabfolgen erstellt wurden. Um die dynamische Skalierung zu berücksichtigen mussten die Original-Gelenkwinkelfolgen verlangsamt abgespielt werden. Die Übereinstimmung zeigt eindrucksvoll die große Ähnlichkeit des Roboters mit seinem natürlichen Vorbild. Neurowissenschaftler nutzen das System vor allem um neue neuronale Modelle der Wirbelsäule und Beinbewegungen zu erstellen. Die entwickelten Designkonzepte um Ergebnisse biologischer Untersuchungen auf Robotersysteme zu übertragen,

können auch für andere Vorbilder verwendet werden. Die Leistungsfähigkeiten der Antriebstechnik, die Materialeigenschaften aber auch die notwendigen komplexen Vorstudien machen dieses Designkonzept jedoch aufwändig bzw. nicht auf alle Systeme leicht übertragbar.

3.4. Stabilitätsbasierte Optimierung mehrbeiniger Laufroboter aus der Literatur

Die Stabilität eines Laufroboters ist wichtiger als die Energieeffizienz und auch die Geschwindigkeit, da ein instabiler Roboter überhaupt nicht eingesetzt werden kann. Grundlegend wird zwischen der statischen und dynamischen Stabilität unterschieden. Eine ausführliche Diskussion dieser unterschiedlichen Ansätze findet sich im nächsten Kapitel 4. Über die Jahre wurden zahlreiche Kriterien entwickelt um die Stabilität eines Roboters zu bewerten [79][96]. Allerdings befassen sich nur wenige Arbeiten mit der zielgerichteten Optimierung dieser Stabilität. Im Folgenden sind einige, wichtige Arbeiten zu kinematischen Anpassungen, Haltungskontrollen und allgemeinen Ansätzen zur Verbesserung der Stabilität zusammengefasst. Neben einer kurzen Bewertung dieser Ansätze erfolgt auch eine Diskussion bzgl. der Übertragbarkeit der Verfahren.

Kinematische Anpassungen zur Steigerung der Stabilität in schwierigem Gelände

Mehrbeinige Laufroboter werden entwickelt um in schwierigem, unwegsamem Gelände eingesetzt zu werden. Auch in unstrukturiertem Gelände darf der Roboter nicht umkippen und muss sich sicher fortbewegen können. Die Kinematik bestimmt maßgeblich die Fähigkeiten eines Roboters und sollte nach Möglichkeit an seine Aufgabe angepasst werden.

Hirose et al. haben bereits früh festgestellt, dass die klassische *Static Stability Margin (SSM)* für Roboter am Hang ungeeignet ist [97]. Für den Einsatz von Laufroboter in einem solchen Gelände haben sie eine neue Stabilitätsmetrik entwickelt, die *Energy Stability Margin (ESM)*. Sowohl die *SSM* wie auch die *ESM* werden ausführlich in Kapitel 4 hergeleitet und diskutiert. In der Abbildung 3.7 ist im linken Teil a) zu erkennen, wie ein Laufroboter mit Hilfe der *SSM* am Hang stehen würden. Im mittleren Teil b) der Abbildung ist der deutlich stabilere Stand anhand der *ESM* Metrik dargestellt. Allerdings zeigt die systematische Optimierung der Stabilität auch, dass die Bein kinematik im Teil b) an ihre Arbeitsraumgrenzen stößt. Aus diesem Grund erweitern *Hirose et al.* den vierbeinigen Laufroboter *TITAN VII* um ausfahrbare Segmente in den Beinen (siehe links in Abbildung 3.7 im unteren Teil c)). Diese kinematische Optimierung wurde für den Laufroboter *TITAN VII* erfolgreich umgesetzt und in verschiedenen Szenarien evaluiert [94]. Rechts in der Abbildung 3.7 ist *TITAN VII* mit ausgefahrenen Beinsegmenten am Hang zu sehen.

Vierbeinige Laufroboter haben oft eine säugetierartige Kinematik. Insbesondere dann, wenn der Fokus auf der dynamischen Lokomotion liegt. Im Gegensatz zu den natürlichen Vorbildern können die meisten vierbeinigen Laufroboter ihr Kniegelenk entweder nach innen oder nach außen stellen. *Gao et al.* haben untersucht welche Grundstellung besser geeignet ist Gräben zu überwinden [77]. Im linken Teil der Abbildung 3.8 sind die vier unterschiedlichen Konfigurationen anschaulich dargestellt. In zahlreichen Simulationen wurden die maximalen Grabenbreiten, die mit den verschiedenen Konfigurationen überwunden werden können, ermittelt. Hier zeigte sich, dass die Konfigurationen FB und BF stabiler sind und der Roboter in diesen Konfigurationen so über die größeren Hindernisse steigen kann. Die systematische Analyse der kinematischen Fähigkeiten lässt sich als Methode problemlos auf andere Systeme übertragen. Die Autoren haben die Untersuchungen vor allem für die Laufroboter *HyQ* und *HyQ2Max* durchgeführt (siehe weitere Details im Anhang A). Allerdings werden hierfür geeignete Simulationswerkzeuge benötigt. Außerdem

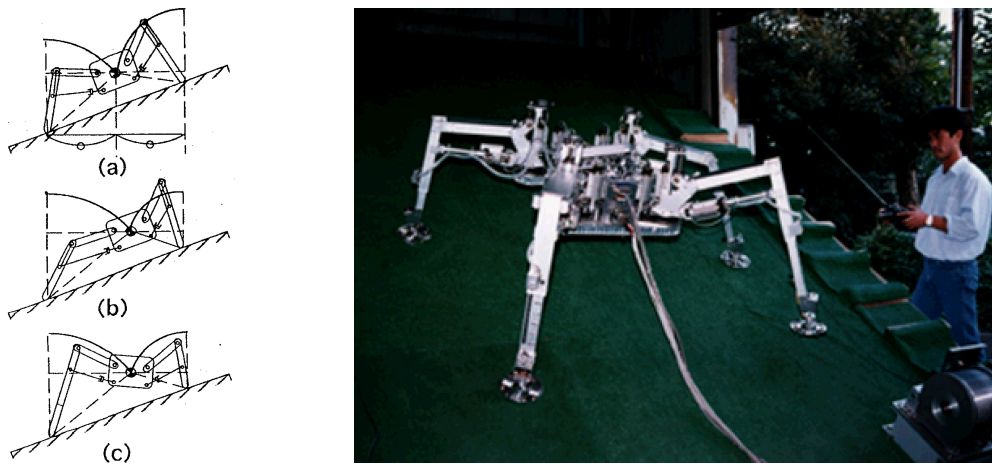


Bild 3.7.: (links) Die *Static Stability Margin (SSM)* ist nicht gut geeignet um die Stabilität eines Laufroboters am Hang zu optimieren: siehe Teil a); die Stabilität kann durch den Einsatz von geeigneten Stabilitätsmetriken signifikant verbessert werden: siehe Teile b), die erhöhte Stabilität in b) schränkt jedoch die Beinbewegungen stark ein, da diese an ihre kinematischen Arbeitsraumgrenzen stoßen; die Kinematik kann durch ausfahrbare Beinsegmente erweitert werden um sicher am Hang zu laufen: siehe Teil c) Quelle [97]; *TITAN VII* Laufroboter mit ausfahrbaren Beinsegmenten am Hang. Quelle [94]

wurde in der Arbeit von *Gao et al.* nur das statisch stabile Laufen untersucht. Weitere Simulationen sind notwendig um zu prüfen, ob sich für dynamische Laufmuster die gleichen Ergebnisse ergeben.

Verbesserte Stabilität durch aktive Haltungskontrolle

Mehrbeinige Laufroboter besitzen in der Regel 12 oder mehr Freiheitsgrade mit denen sie ihren Zentralkörper relativ zu den Beinen bewegen können. Bei sechsbeinigen Laufroboter mit jeweils vier Gelenken pro Bein stehen hierfür sogar 24 Freiheitsgrade zur Verfügung. Die aktive, gezielte Verschiebung des Zentralkörpers relativ zu den Beinen ermöglicht es den Schwerpunkt zu verschieben und damit Einfluss auf die Stabilität zu nehmen. Weiter kann über die Orientierung sowie Positionierung des Körpers auch der kinematische Arbeitsraum der Beine verändert werden. Insbesondere in schwierigem Gelände mit hohen Hindernissen und Steigungen können Laufroboter durch die Arbeitsraumgrenzen in ihrer Flexibilität ansonsten eingeschränkt werden.

Belter et al. präsentieren in ihrer Arbeit ein Verfahren, mit dem die Position und Orientierung (Pose) des Zentralkörpers optimiert werden kann [23]. Das Verfahren basiert auf einem *Partikel-Schwarm-Optimierer (PSO)*, der gleichzeitig die statische Stabilität optimiert und die Arbeitsraumgrenzen der Beine berücksichtigt. Der Laufroboter *MESSOR* besitzt eine komplexe Bewegungsplanung um einen sicheren Weg auch durch unwegsamen Gelände zu finden. Dieser Bewegungsplaner verwendet einen Sampling-basierten Ansatz (RRT-Connect) um gute Fußpunkte bis zum Ziel zu finden. Der *PSO* ist in diesen Bewegungsplaner integriert und optimiert für die gefundenen Fußpunkte die Position sowie Orientierung der Zentralkörpers relativ zu den Füßen. In der Abbildung 3.8 ist im rechten Teil ein Experiment zur Evaluation des Ansatzes dargestellt. Der sechsbeinige Laufroboter *MESSOR* kann erfolgreich über einen Baumstamm klettern und weicht dem großen Baum effektiv aus (siehe Anhang A für weitere Details zum Laufroboter *MESSOR*). Der *Partikel-Schwarm-Optimierer* wurde auf die Funktionsweise des *MESSOR* Roboters zugeschnitten und kann nicht direkt auf andere Systeme übertragen werden. Dennoch bietet der Ansatz mit der veränderbaren Fitnessfunktion eine interessante Möglichkeit auch scheinbar widersprüchliche Ziele gleichzeitig zu optimieren.

3. Stand der Forschung im Bereich mehrbeiniger Laufroboter

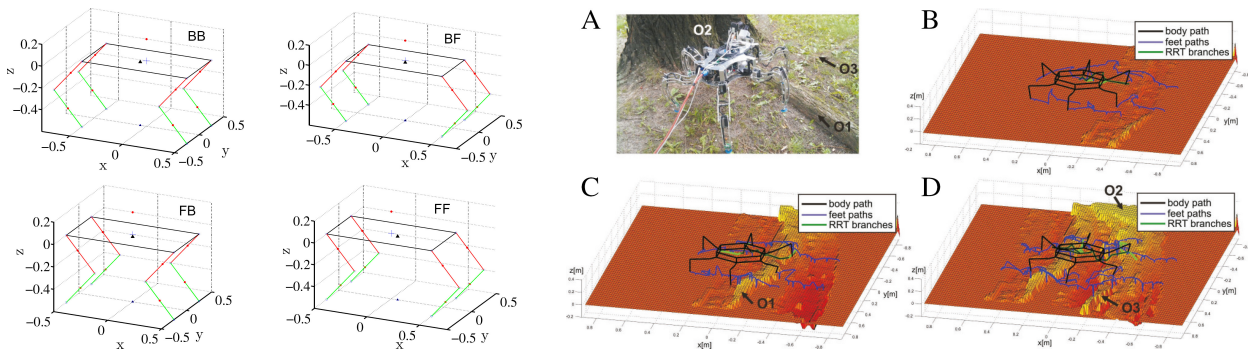


Bild 3.8.: (links) Mögliche Kniegelenk-Konfigurationen eines typischen, vierbeinigen Laufroboters wie z.B. von *HyQ* Quelle [77]; (rechts) Sechsheiniger Laufroboter *MESSOR* während der Evaluation der PSO-basierten Haltungskontrolle zur Verbesserung der Stabilität in schwierigem Gelände. Quelle [23]

Analysen der Kinematiken und Anpassung der Laufmuster

Vor der Entwicklung eines neuen Laufroboter-Konzeptes müssen zentrale Fragestellungen beantwortet werden. Soll der Roboter dynamisch oder statisch stabil laufen? Wie viele Beine soll der Roboter besitzen mit wie vielen Gelenken pro Bein? Kinematische Analysen können dabei unterstützen einen leistungsstarken Roboter zu entwickeln.

In der Arbeit von *Ding et al.* werden die wichtigsten Designentscheidungen für sechsheinige Laufroboter zusammengefasst [64]. Hierbei werden verschiedene Bein Konfigurationen am Zentralkörper sowie dazu passende Laufmuster untersucht. Die Arbeit konzentriert sich vor allem auf statisch stabile Laufroboter mit sechs Beinen. Eine Erweiterung bezüglich allgemeiner Designkonzepte für vierbeinige und/oder dynamischer Laufroboter könnte die vorgestellten Methoden und Ansätze auf noch mehr Systeme anwendbar machen. *Mang und Kim* entwickelten ein Fehler-tolerantes Laufmuster, das sich dynamisch bei Defekten anpasst. Steht ein Bein nicht mehr zur Verfügung wird die Schrittreihenfolge so angepasst, dass die Stabilität weiter sichergestellt werden kann [230]. Ähnliche Ansätzen verfolgen *Jakimovski et al.* mit dem Roboter *OSCAR*, der sich ebenfalls bei einem Beindefekt durch einen *Organic Computing* Ansatz dynamisch an die neue Kinematik anpassen kann [112]. Der *Snapbot* aus dem Anhang A verändert ebenfalls das Laufmuster und die Beinbewegungen je nach Beinanzahl [123]. Dieser Ansatz optimiert im klassischen Sinne nicht die Stabilität, da auch kriechende Bewegungen erlaubt sind. Die vorgestellten Ansätze weisen einige Gemeinsamkeiten auf, die auch auf andere Laufroboter übertragen werden können. Die Kinematik wird entweder gezielt an eine Aufgabe angepasst oder die Steuerung bzw. Bein Koordination wird flexibel an die (veränderliche) Gesamtkinematik adaptiert. Hieraus kann allgemeingültig geschlossen werden, dass die Kinematik und das Steuerungskonzept stets aufeinander abgestimmt sein müssen um eine hohe Stabilität zu erreichen.

3.5. Energetische Optimierung mehrbeiniger Laufroboter aus der Literatur

In der Literatur finden sich sehr unterschiedliche Ansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz beim Laufen. In diesem Abschnitt werden Arbeiten vorgestellt und diskutiert, die sich mit der Auslegung der Kinematik, dem Einbringen von elastischen Elementen, dem Einsatz von hochentwickelten Regelungskonzepten sowie energetisch-optimierten Antrieben befassen. Am Ende erfolgt jeweils eine kurze Bewertung hinsichtlich der Übertragbarkeit auf andere Robotersysteme.

Dynamisch optimierte, selbststabilisierende Kinematiken

Eine etablierte Methode die Energieeffizienz von Laufroboter zu verbessern ist der Einsatz von dynamisch optimierten Kinematiken. Eine solche Kinematike wird z.B. bei einem *Passiv Dynamic Walker* eingesetzt. Hierbei wird die selbststabilisierende Eigenschwingung des Systems so ausgelegt, dass ein sehr effizientes Laufen möglich wird. Auch bei kleineren Störungen kehrt die Laufbewegungen durch diese intrinsischen Eigenschwingungen stets zu einem stabilen, extrem effizienten Laufzyklus zurück. Die ersten, passiven Laufroboter benötigten für die eigenständige Fortbewegung noch eine Schräge [143]. Jedoch können neuere Systeme durch kleine Motoren auch ohne Schräge laufen. Eine umfangreiche Einführung sowie Details zur mathematischen Modellierung der *Passiv Dynamic Walker* findet sich in der Arbeit von *McGeer* [143].

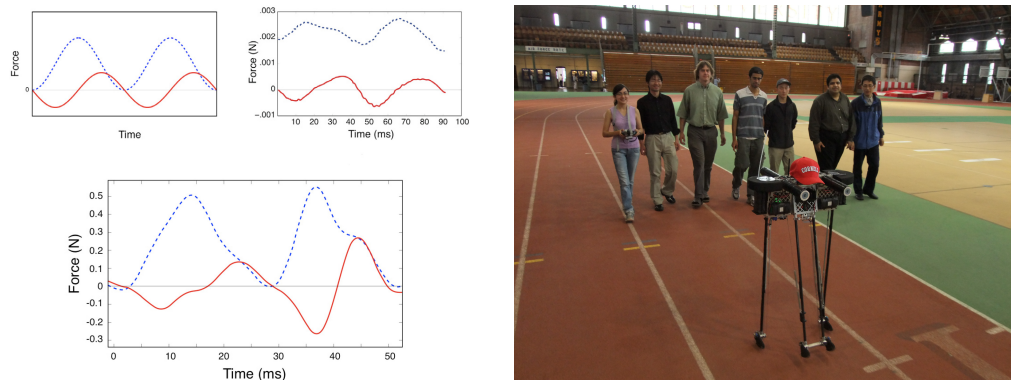


Bild 3.9.: (links) Profile der horizontalen (rote, geschlossene Linien) und vertikalen (blaue, gepunktete Linien) Kraft beim Laufen: (oben links) Profile des SLIP-Modells, (oben rechts) Kraftprofile der Kakerlake, (unten) Kraftprofile des *DASH* Laufroboters, der mit nur einem Motor Geschwindigkeiten von 1,5 m/s erreicht. Quelle [31]; (rechts) *Ranger*, einer der effizientesten Laufroboter überhaupt mit einer *TCoT* von 0,19 beim Ultra-Marathon. Quelle [27]

Den aktuellen Effizienzrekord mit einer *Total Cost of Transport (TCoT)* von 0,19 hält der Roboter *Ranger* von der Cornell University, NY, USA [28] [27]. Die *TCoT* ist eine normierte Energieeffizienzmetrik, die im Kapitel 4 ausführlich vorgestellt und diskutiert wird. Im Gegensatz zu vielen anderen *Passiv Dynamic Walker* besitzt *Ranger* quasi vier Beine und zählt damit zu den mehrbeinigen Laufrobotern. Allerdings sind jeweils zwei Beine starr miteinander verbunden, was die Komplexität wiederum deutlich reduziert. *Ranger* ist effizienter als der Vorgänger [49], effizienter als der Mensch ($CoT=0,3$) [67] und konnte außerdem einen beeindruckenden Streckenrekord aufstellen. *Ranger* ist mit einer einzigen Batterieladung 186.076 Schritte weit gelaufen. Für die insgesamt 65 km lange Strecke benötigte er etwas mehr als 30 Stunden. Auch wenn *Ranger* keine weiteren Aufgaben übernehmen kann und stark für das Laufen optimiert wurde, zeigt die beeindruckende Leistung, dass aktuelle, mehrbeinige Laufroboter noch viel Potential für Verbesserungen haben.

Einfache, robuste Kinematiken nach biologischen Vorbildern

Die Energieeffizienz eines mehrbeinigen Laufroboters kann auf unterschiedliche Art und Weise gesteigert werden. Das Gewicht bei gleichbleibender Leistung zu reduzieren, ist ein bekanntes und erprobtes Konzept, das mittlerweile von nahezu allen Entwicklern verfolgt wird. Die Laufgeschwindigkeit zu steigern ist ein weiteres Verfahren um die Effizienz zu erhöhen. Als dritte Option kann Energie in elastischen Elementen zwischengespeichert werden um den Verbrauch zu reduzieren. Der Blick auf die biologischen Vorbildern zeigt, dass alle drei Konzepte in der Natur genutzt werden. Insbesondere der letzte Aspekt wurde von Bio-

3. Stand der Forschung im Bereich mehrbeiniger Laufroboter

logen wie *Blickhan und Full* bereits sehr gut im sogenannten SLIP-Modell (Spring-Loaded Inverted Pendulum) erfasst [33]. Dieses Feder-Masse-Modell wurde im Abschnitt 2.5 bereits ausführlich vorgestellt. Einige Entwickler von mehrbeinigen Laufroboter haben sich zum Ziel gesetzt schnelle, effiziente Laufroboter nach dem SLIP-Modell zu konzipieren. *Birkmeyer et al.* haben den leichten, sechsbeinigen Laufroboter *DASH* mit genau diesen Zielen entwickelt [31]. *DASH* läuft ohne jegliches Sensorfeedback mit einer einfachen Steuerung und folgt damit dem biologischen Konzept der sogenannten zentralen Mustergeneratoren (CPG - Central Pattern Generator - mehr Informationen zu CPGs können der folgenden Arbeit entnommen werden [84]). Mit einem Antriebskonzept nach dem Vorbild von *Tschebyschow* [139], das mit nur einem Motor auskommt, sowie einer extrem leichten Bauweise aus Kompositmaterialien, besitzt *DASH* ein Gesamtgewicht von nur 16,2 g. Links in der Abbildung 3.9 sind drei unterschiedliche Verläufe der Bodenkontaktkraftprofile dargestellt. Im oberen, linken Teil dieser Abbildung sind die Verläufe der vertikalen und horizontalen Kräfte für das ideale SLIP-Modell dargestellt. Rechts daneben werden aus Experimenten mit Kakerlaken erfasste Kraftprofile gezeigt. Die Ähnlichkeit dieser beiden oberen Profile belegt, dass das SLIP-Modell in der Lage ist die natürliche Lokomotion grundlegend zu modellieren. In unteren Teil der linken Abbildung 3.9 sind die Kraftprofile für den entwickelten *DASH* Laufroboter dargestellt. Diese Profile zusammen mit den beeindruckenden Geschwindigkeiten von bis zu 1,5 m/s bei minimalen Energieverbrauch zeigen die Leistungsfähigkeit dieser einfachen Kinematiken.

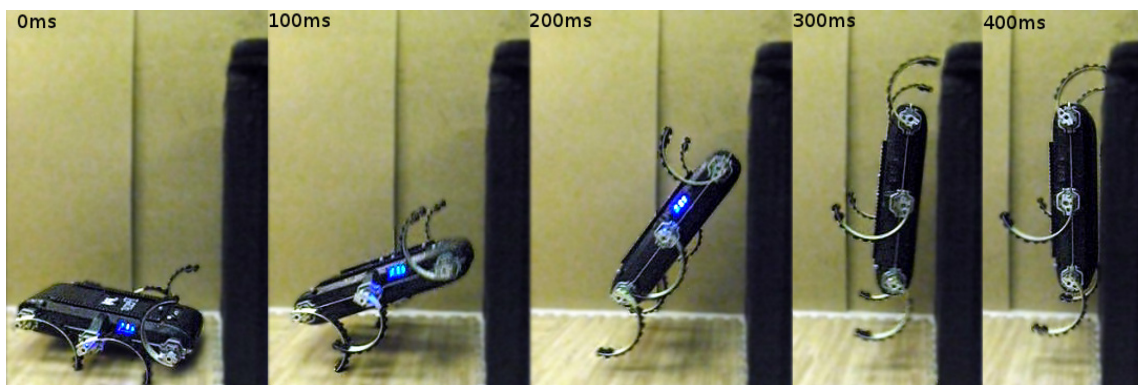


Bild 3.10.: *RHex* bzw. *XRL* (eine Variante des *RHex* Roboters) ist in der Lage präzise, dynamische Bewegungen auszuführen. Quelle [113]

Ein weiterer Laufroboter, der hohe Geschwindigkeiten und eine hervorragende Energieeffizienz erreicht, ist der sechsbeinige *RHex* mit insgesamt nur sechs unabhängigen Motoren. *Saranli et al.* haben mit *RHex* ein System entwickelt, dass zwar von der Antriebstechnik her an radgetriebenes System erinnert, von der Lokomotion her, jedoch einer Kakerlake sehr ähnlich ist [187]. Jeder Motor treibt ein sehr leichtes, rotierendes Bein an (siehe Abbildung A.10). Die Beinbewegungen aller sechs Beine sind zeitlich penibel aufeinander abgestimmt. Durch diese Synchronisation entsteht ein stabiles Tripod Laufmuster mit hohen Geschwindigkeiten. Weitere Arbeiten konnten zum einen zeigen, dass auch *RHex* nach dem Vorbild des SLIP-Modells und damit sehr ähnlich zu einer Kakerlake läuft. Zum anderen konnten die Laufgeschwindigkeit sowie Energieeffizienz anhand eines speziellen Optimierers deutlich gesteigert werden [224]. Die Laufgeschwindigkeit konnte um den Faktor drei auf beeindruckende 2,7 m/s gesteigert werden. Außerdem wurde die *Specific Resistance* auf ein Minimum von 0,6 reduziert (weitere Informationen zur *Specific Resistance* als Energieeffizienzmetrik finden sich in Kapitel 4). Das *RHex* Laufroboterkonzept wurde von Boston Dynamics aufgegriffen und verwendet um eine robustere Version des Systems zu entwickeln. Auch dieses robuste

RHex System erreicht trotz eines erhöhten Gewichts noch Geschwindigkeiten von bis zu 1,2 m/s. Die vorgestellten Lokomotionskonzepte von *RHex* sowie *DASH* lassen sich schwer auf andere Systeme übertragen. Vielmehr bilden diese Roboter mit weiteren Systemen wie *iSprawl* [124] eine eigene Laufroboterklasse. Die Systeme weisen eine hohe Dynamik auf, sind aber nicht alle dazu geeignet in realen Anwendungen eingesetzt zu werden. Problematisch hierfür ist z.T. die Größe, die das Mitführen von Sensoren oder Elektronik schwierig macht. Auch die Genauigkeit mit der solche schnellen, einfachen Laufroboter gesteuert werden können, ist oft beschränkt. Dies gilt nicht für das *RHex* Konzept. Sowohl die Robustheit der von Boston Dynamics entwickelten Variante übertrifft die Zuverlässigkeit vieler anderer Systeme, aber auch die Präzision mit der *RHex* Hindernisse überwinden kann ist schwer von anderen Systemen zu erreichen [113].

Kraft- und momentenbasierte Gesamtkörperregelung mit nachgiebigen Antrieben



Bild 3.11.: Der Laufroboter *ANYmal* kann durch die integrierte Kraftregelung auch im Sand robust und effizient laufen. Quelle [131]

Neben Leichtbau-Konzepten und der radikalen Gewichtsreduktion gibt es auch moderne Laufroboter, die auf den Einsatz spezieller Antriebe sowie fortschrittlicher Regelungskonzepte setzen um die Energieeffizienz zu steigern. Beim Laufen geht bei klassischen, positionsgeregelten Laufrobotern viel Energie bei der Interaktion mit dem Untergrund verloren. Vor allem die Kollisionen mit dem Untergrund, aber auch der Schlupf während der Stemmphase verbrauchen unnötig Energie. Mit kraft- und momentengeregelten Robotern sowie speziellen Antrieben können diese Effekte minimiert werden und nicht nur ein sehr dynamisches, schnelles, sondern auch ein sehr effizientes Laufen erreicht werden. *Hutter et al.* haben basierend auf den Erfahrungen mit dem vierbeinigen Roboter *StarLETH* neue, kompakte Antriebe entwickelt, die genau diese Voraussetzungen erfüllen können [102]. Hierfür wurden sogenannten *Serial Elastic Actuators (SEA)* zusammen mit leistungsstarker Steuerungselektronik in ein kompaktes, abgeschlossenes Gehäuse integriert. Die *ANYdrives*, wie sie von der neu ausgegründeten Firma *ANYbotics* aus Zürich vertrieben werden, bilden die Basis für den vierbeinigen Laufroboter *ANYmal* [104]. In den *ANYdrives* befindet sich zwischen der Ausgangswelle und dem Getriebe eine nachgiebige Feder, die nicht nur Stöße abfangen, sondern auch Energie beim Laufen kurzzeitig zwischenspeichern kann. Die guten Lokomotionsleistungen werden vor allem durch die intelligente Kraft-Momenten-Reglung aller Gelenks erreicht. Hierdurch kann der Schlupf zwischen Roboter und Untergrund ebenso wie der Einfluss der Kollisionen deutlich reduziert werden. *ANYmal* kann auch effizient und schnell durch weichen, nachgiebigen Untergrund laufen [131], was für Laufroboter ansonsten eine große Herausforderung darstellt (siehe Abbildung 3.11). Die Basis hierfür bilden die kontinuierlich weiterentwickelten Dynamikmodelle und Regelungsstrategien für die dynamische, mehrbeinige Lokomoti-

on. Erst kürzlich wurden diese sehr fortschrittlichen Konzepte durch neue Ansätze des *Policy Learning* in der Simulation zusammen mit neuen Verfahren zur Abbildung der gelernten Strategien weiter verbessert [106]. Der Roboter *ANYmal* erreicht durch diese Verbesserungen höhere Laufgeschwindigkeiten und wurde gleichzeitig energieeffizienter. Die gelernten, fortschrittlichen Reglerkonzepte lassen sich nicht direkt auf andere Roboter übertragen. Aber die zugrundeliegende Strategie wie die Verwendung der modernen SEA-Antriebe und der Einsatz fortschrittlicher Regelungskonzepte sind Methoden, die auf andere Systeme übertragbar sind.

Energieverluste bei der Lokomotion minimieren

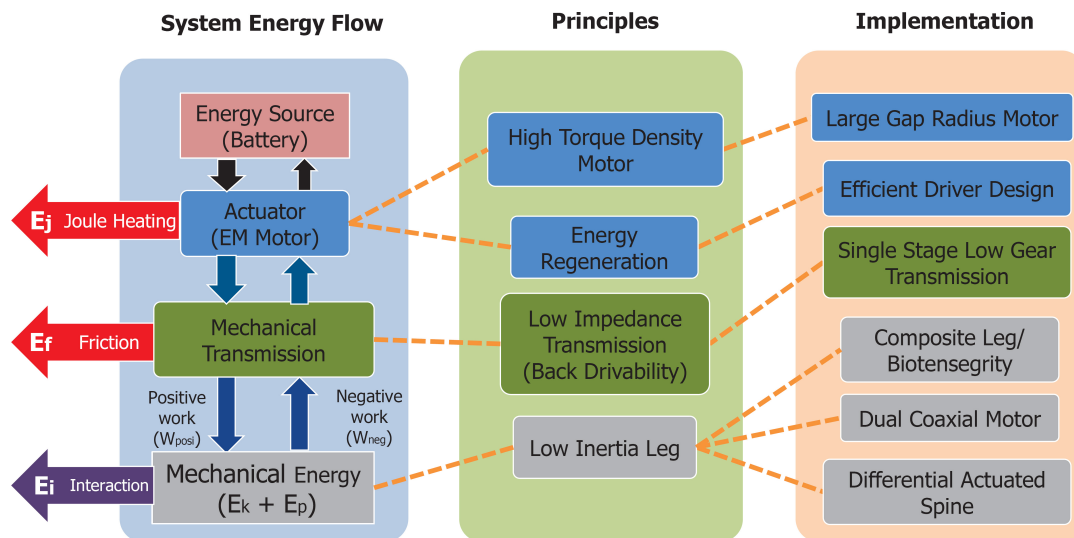


Bild 3.12.: Darstellung der Verlustleistungen, der vier Designregeln zur Steigerung der Energieeffizienz sowie der Umsetzung im *MIT Cheetah*. Quelle [201]

Die Energieeffizienz wird vor allem durch Verlustleistungen bestimmt, die nicht in die Vorwärtsbewegung des Roboters einfließen. Alle Laufroboter erzeugen diese Verluste an vielen verschiedenen Stellen. Doch die meisten Verluste könnten durch kleinere Veränderungen relativ einfach reduziert werden. *Seok et al.* haben während der Entwicklung des vierbeinigen *MIT Cheetah* eine Reihe von Designregeln zur Reduktion genau dieser energetischen Verluste erstellt [201]. Die Autoren konnten vor allem drei zentrale Energieverlustquellen identifizieren. Zum einen sind es Verluste in der Antriebstechnik (hauptsächlich Wärmeverluste), des weiteren Reibungsverluste bei der Übertragung der Antriebsmomente, sowie Verluste durch die Interaktion mit der Umgebung. Die vier entwickelten Designregeln helfen dabei die Verluste zu minimieren und so die Energieeffizienz zu verbessern. Die bisher kurzen Betriebszeiten von Laufrobotern sind eine starke Einschränkung für reale Anwendungen. Entsprechend ist die Steigerung der Energieeffizienz ein zentrales, wichtiges Thema. *Seok et al.* nutzen in ihrer Arbeit die *Cost of Transport (CoT)*, die quasi identisch zur *Specific Resistance* ist, um die Energieeffizienz verschiedener Laufroboter zu vergleichen (mehr Details zu der CoT werden in Kapitel 4 vorgestellt). Die meisten, vergleichbaren Arbeiten betrachten bisher nur die mechanische Antriebsleistung. Untersuchungen mit *MIT Cheetah* haben jedoch gezeigt, dass diese mechanische Energie nur ca. 26% der insgesamt verbrauchten Energie ausmacht. In weiteren Analysen betrachten die Autoren stets den Gesamtverbrauch, inklusive der Onboard-Elektronik und PC-Komponenten. Die vier Designregeln lassen sich wie folgt zusammenfassen: 1. leistungsdichte Drehmoment-Motoren verwenden um die thermische Verlustleistung zu minimieren, 2. Energierückflüsse im System zulassen - beim

MIT Cheetah wurden keine elastischen Elemente eingefügt, sondern eine schnelle Impedanzregelung umgesetzt, 3. Verzicht auf verlustbehaftete Getriebe/Getriebestufen, 4. Trägheit bzw. Masse der schwingenden Beine reduzieren. In der Abbildung 3.12 sind nicht nur diese Designregeln, sondern auch die wichtigsten Verlustleistungen dargestellt. Außerdem ist ganz rechts im Schaubild zusätzlich beschrieben wie die Entwickler beim *MIT Cheetah* die Designregeln konkret umgesetzt haben. Mit 6,0 m/s erreichte der Roboter schon bei den ersten Versuchen beeindruckende Geschwindigkeiten und einen sehr guten *CoT* Wert von 0,5. Die zweite Generation des Roboters (*MIT Cheetah 2*) kann stabil außerhalb des Labors z.B. auf der Wiese laufen [164]. Die konkreten Technologien des *MIT Cheetah* lassen sich nicht einfach auf andere Systeme übertragen. Die speziellen Drehmoment-Motoren sowie die Leistungselektronik mit Energierückflüssen sind keine handelsüblichen Komponenten, die für andere Laufroboter zur Verfügung stehen. Die vier Designregeln lassen sich dennoch auf viele mehrbeinige Laufroboter anwenden. Außerdem schärft die Analyse der Verlustleistungen das Bewusstsein anderer Forscher und Entwickler bei der Konzeption neuer Laufroboter.

3.6. Laufroboter LAURON

Der sechsbeinige, insektenartige Roboter *LAURON* wird seit vielen Jahren am FZI Forschungszentrum Informatik in Karlsruhe entwickelt. Bereits 1992 entstand das erste Holzmodell *INSECT*, bei dem die kinematische Struktur des Laufroboters nach dem Vorbild der indischen Stabheuschrecke *Carausius morosus* konzipiert wurde. Dieser erste Prototyp hatte noch keine Antriebe, sondern nur Gelenkpotiometer um Daten für maschinelle Lernverfahren zu erzeugen. Bereits zwei Jahre später entstand die erste *LAURON* Generation mit sechs Beinen und jeweils drei Gelenken pro Bein. Der Name *LAURON* leitet sich von dieser ersten Generation ab, bei der neuronale Netze im Fokus der Forschung standen: *LAURON* *Neuronal gesteuert*. Im Jahr 1995 entstand die zweite Generation, *LAURON II*, die sich durch eine robustere Mechanik auszeichnete. Das sichere, stabile Laufen in schwierigem Gelände stand im Vordergrund. Im Gegensatz zu *LAURON I* wurde Aluminium als Werkstoff eingesetzt. Für *LAURON III* (ab 1999) wurden nur kleinere Verbesserungen an der Mechanik vorgenommen. Jedoch konnten die Fähigkeiten dieses Roboters durch eine neue reaktive Steuerung und dem Einsatz von hochauflösenden Umgebungssensoren deutlich gesteigert werden. *LAURON III* konnte bereits ein 2,5D-Umweltmodell erstellen und selbstständig zu gewünschten Zielen navigieren [80]. In der Abbildung 3.13 sind die ersten Laufroboter der *LAURON*-Reihe dargestellt.

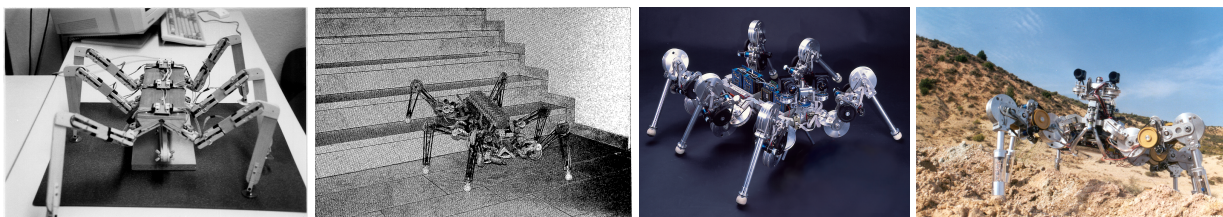


Bild 3.13.: Entwicklung der Laufroboterreihe *LAURON*: (links) Holzmodell *INSECT*, (mittig links) *LAURON I* Quelle [110], (mittig rechts) *LAURON II*, (rechts) *LAURON III*

LAURON IV Die vierte *LAURON* Generation wurde im Jahr 2004 fertig gestellt. Im Vergleich zur vorherigen Generation wurde *LAURON IV* mechanisch stark überarbeitet um die Robustheit des Systems weiter zu steigern. Neu waren z.B. die Zahnriemen um das Drehmoment der Motoren in die Gelenke zu über-

3. Stand der Forschung im Bereich mehrbeiniger Laufroboter

tragen. Die Anzahl der Gelenke sowie die Anordnung und Längenverhältnisse der Segmente orientieren sich jedoch weiterhin an der Stabheuschrecke. Die Beine sind bei *LAURON IV* an einem Zentralkörper aus Karbon angebracht, der die Komponenten innerhalb des Roboters schützt. Im Inneren befinden sich neben NiMH Akkumulatoren, die *LAURON* für ca. 60 min mit Energie versorgen, zwei Industrie-PC/104 und 7 UCoMs [177], die die 6 Beine und den Kopf regeln. *LAURON IV* besitzt eine Aufstandsfläche von ca. 1,2 x 1,0 m und erreicht ein Gesamtgewicht von ca. 28 kg. Die dritte Version dieser vierten Generation *LAURON IVc* unterscheidet sich nur minimal in den Getriebehalterungen von den beiden vorherigen Versionen. Die insgesamt 20 Freiheitsgrade (3 Gelenke pro Bein und 2 Gelenke im Kopf) werden von einer



Bild 3.14.: Vierte Generation des sechsbeinigen Laufroboters *LAURON*: *LAURON IVc* besitzt eine biologisch inspirierte Kinematik mit einer robusten Mechanik, die den Einsatz des Roboters auch in schwierigen Gelände möglich macht.

reaktiven, verhaltensbasierten Robotersteuerung koordiniert [Kerscher et al., 2008a]. Basierend auf einem mit dem Roboter erstellten 3D-Umweltmodell kann *LAURON IVc* seine Fußpunkte planen um sicher und effektiv über schwierige Hindernisse zu laufen [Roennau et al., 2009a]. Die Steigerung der Robustheit in Kombination mit der reaktiven Robotersteuerung macht es möglich *LAURON IVc* sehr anwendungsnah einzusetzen. In der Arbeit von *Ziegenmeyer* wurde z.B. eine semantische Missionsplanung entwickelt, die es *LAURON IVc* erlaubt selbstständig Abfall zu finden und einzusammeln [238]. Der sechsbeinige Laufroboter *LAURON IVc* kann mit sehr unterschiedlichen Sensoren ausgestattet werden. Neben den Sensoren auf dem beweglichen Kopf verfügt *LAURON* auch über eine 360° Panorama-Kamera auf dem Rücken, die zur Teleoperation in gefährlichen Umgebungen eingesetzt werden kann [3]. *LAURON IVc* wurde intensiv in dieser Arbeit verwendet um verschiedene Ansätze und Optimierungsverfahren zu entwickeln und zu evaluieren. Viele der Analyseansätze wie z.B. die präzise Motorstrommessung, die Geschwindigkeitsmessung und die dynamische Simulationsumgebung *RoaDS* wurden initial für *LAURON IVc* entwickelt. Ebenso wurden Optimierungsverfahren wie die Hysterese-Bodenkontaktfusion, die *heterogenen Schrittweiten* oder auch die adaptiven Fußtrajektorien verwendet um die Laufleistung von *LAURON IVc* zu verbessern. Die später in dieser Arbeit vorgestellte Evaluation wurde mit diesem Laufroboter durchgeführt. Nach mehr als 10 Jahren wurde *LAURON IVc* im Jahr 2014 nach einem Motordefekt nicht wieder in Betrieb genommen. Alle weiteren Analysen, Optimierungen und auch die Evaluation dieser Arbeit wurden daraufhin mit dem Nachfolger *LAURON V* durchgeführt.

LAURON V Die fünfte *LAURON* Generation wurde das erste Mal auf der *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* im Jahr 2013 der Öffentlichkeit vorgestellt. Dieser Roboter unterscheidet sich durch das zusätzliche DELTA-Gelenk in den Beinen stark von den bisherigen *LAURON*-Generationen (siehe Abbildung 3.15). Dieses Gelenk ist auch in der Stabheuschrecke *Carausius morosus* als Coxa Gelenk vorhanden, wurde jedoch in den vorherigen Generationen um die Komplexität zu reduzieren nicht modelliert. *LAURON V* wurde mit diesem vierten Gelenk ausgestattet um in schwierigerem, rauem Gelände besser Hindernisse überwinden zu können. Das Gelenk erlaubt es das ALPHA-Gelenk, das für den Vortrieb verantwortlich ist, zu entlasten. Die beiden Gelenke ALPHA und DELTA wurde möglichst kompakt und dicht am Zentralkörper platziert um das Gewicht bzw. die Trägheit der Beine möglichst klein zu halten. Die restliche Bein konstruktion orientiert sich stark an dem Bein-Design von *LAURON IVc*. In der Abbildung 3.15 sind die Gelenke der Stabheuschrecke, *LAURON IVc* und der aktuellen *LAURON V* Generation anschaulich dargestellt. Des Weiteren wurden im Rahmen dieser Arbeit für die Konzeption des Laufro-

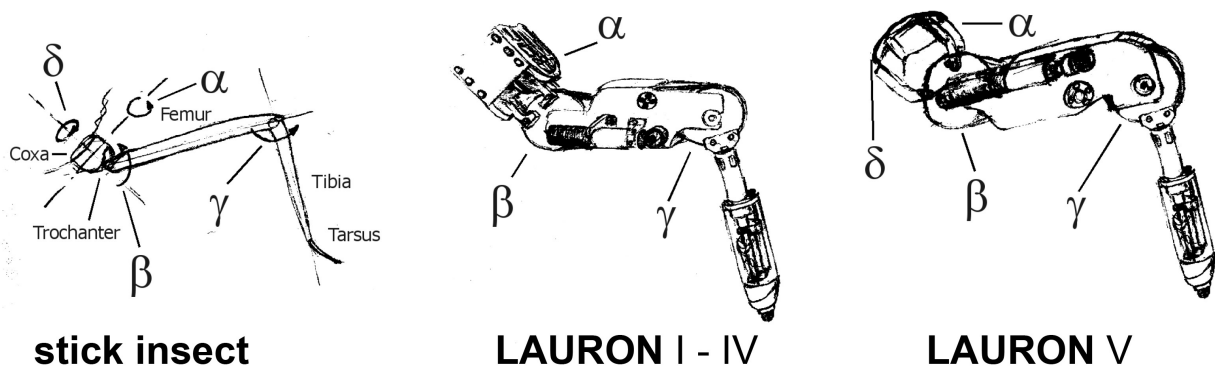


Bild 3.15.: Evolutionäre Entwicklung der *LAURON V* Bein kinematik: (links) Vorbild indische Stabheuschrecke, (mitig) *LAURON IVc* Bein mit den drei Gelenken ALPHA, BETA, Gamma, (rechts) *LAURON V* Bein mit den vier Gelenken DELTA, ALPHA, BETA, GAMMA. Quelle [Roennau et al., 2014c]

boters *LAURON V* Verfahren und Methoden zur kinematischen Optimierung entwickelt und angewandt. Als Ergebnis besitzt *LAURON V* eine besondere Bein anordnung am Zentralkörper, die dessen Geländegängigkeit verbessert und zugleich biologisch motiviert ist [Roennau et al., 2013a][Roennau et al., 2014c]. *LAURON V* hat im Gegensatz zu der vorherigen Generation einen sehr stabilen Leichtbau-Zentralkörper, der für die ermittelten Belastungen optimiert wurde. In der Abbildung 3.16 ist der neue Zentralkörper gut zu erkennen. Durch diesen robusten Zentralkörper, das zusätzliche Gelenk pro Bein sowie die größeren LiPo-Akkumulatoren ergibt sich für *LAURON V* ein Gesamtgewicht von 42 kg [Roennau et al., 2014c]. Die Aufstandsfläche liegt bei ca. 0,9 x 0,8 m, so dass auch *LAURON V* mühelos durch Türen laufen kann. Mit den neuen, größeren Akkumulatoren kann *LAURON* mehr als 120 min autonom Laufen, die Umwelt erfassen und Proben einsammeln. Die Beine werden weiterhin wie bei *LAURON IVc* durch UCoMs geregelt [177]. Durch die insgesamt 26 Freiheitsgrade sind bei *LAURON V* sogar 9 UCoMs notwendig. *LAURON V* besitzt eine verhaltensbasierte, reaktive Robotersteuerung, die dahingehend angepasst bzw. weiterentwickelt wurde um die zusätzlichen DELTA-Gelenke mit der veränderten Kinematik zuverlässig ansteuern zu können [Kerscher et al., 2008a][Roennau et al., 2014d]. Das Sensorsystem von *LAURON V* ist sehr flexibel. Während der meisten Anwendungen wird *LAURON V* mit einem Stereo-System sowie einer weiteren RGB-D Kamera im Kopf, einem rotierenden 3D-Laserscanner [Pfozter et al., 2014] auf dem Rücken und weiteren

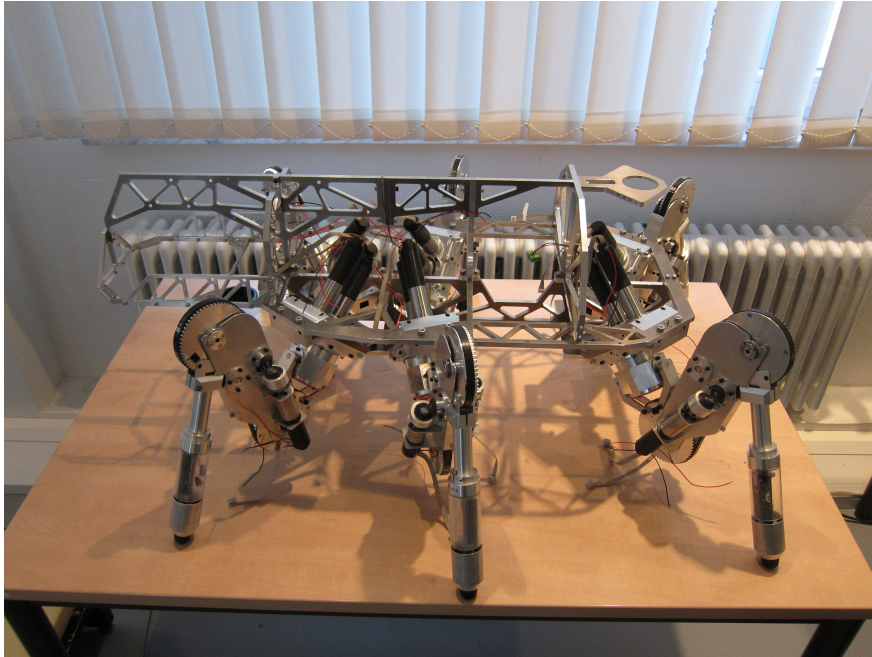


Bild 3.16.: Robuster und leichter Zentralkörper von *LAURON V*. Quelle [Roennau et al., 2014c]

RGB-D Kameras zur Lokalisierung ausgestattet [Heppner et al., 2015]. Um die Umweltmodellierung, Lokalisierung sowie die Bildverarbeitung online durchführen zu können, verfügt *LAURON V* über insgesamt drei unabhängige PCs. Das System wurde mit umfangreicher Software zur 3D-Kartierung, Lokalisierung in

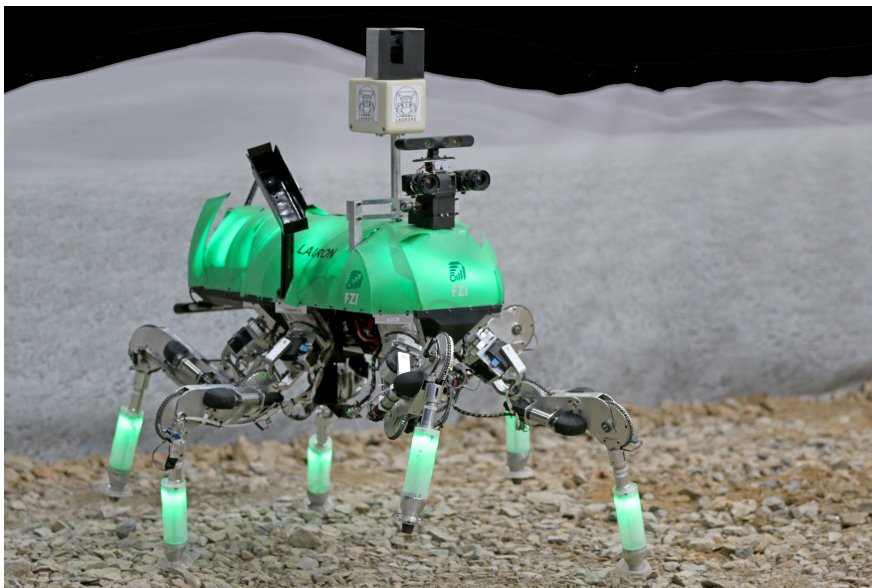


Bild 3.17.: Sechsbeiniger Laufroboter *LAURON V* während des DLR SpaceBot Camps 2015 mit 3D-Laserscanner auf dem Rücken.

unbekannten Umgebungen ohne GPS, zur Planung bzw. Navigation und autonomen Entscheidungsfindung ausgestattet (PlexNav) [Oberländer et al., 2014]. Den hohen Grad an Autonomie konnte *LAURON V* bereits zwei Mal beim *DLR SpaceBot Cup 2013* und dem *DLR SpaceBot Camp 2015* erfolgreich unter Beweis stellen¹. Die Konzeption sowie der Aufbau des Laufroboters *LAURON V* sind ein Teil dieser Arbeit. Zugleich

¹Details zur DLR SpaceBot Cup: https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151_read-12396/%23/gallery/17400

wurde der Roboter verwendet um Analysen sowie Optimierungsverfahren zu entwickeln und zu evaluieren. So werden z.B. im weiteren Verlauf dieser Arbeit Methoden zur Optimierung der Stabilität durch den gezielten Einsatz der neuen, redundanten DELTA-Gelenke oder auch Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz vorgestellt und mit *LAURON V* intensiv evaluiert.

3.7. Bewertung potentieller Laufroboter-Anwendungen

Laufroboter sind, wie in dem Kapitel ausführlich dargestellt, für zahlreiche Anwendungen einsetzbar. An dieser Stelle soll jedoch diskutiert werden, in welchen Anwendungen auch ein wirtschaftlich erfolgreicher Einsatz möglich ist. Vorweg sollte herausgestellt werden, dass es bereits einen Bereich gibt, in dem Laufroboter wirtschaftlich sehr erfolgreich sind. Der Entertainment-Bereich lebt vor allem von der Faszination für das technische Laufen. Neben sehr kleinen Spielzeugrobotern wie die *Hexabugs*[93] sind auch durchaus größere Robotersysteme wie der Sony *aibo*[122] in ihrer Nische erfolgreich. Andere Anwendungen besitzen hingegen nur einen sehr kleinen, beschränkten Markt. Sie könnten dennoch kommerziell erfolgreich werden. Es gibt z.B. bereits Unterwasser-Laufroboter, die für Inspektions- und Forschungsarbeiten eingesetzt werden (z.B. *Crabster CR200*[166]). Aufgaben wie das Verlegen von Tiefseekabeln, Pipelines oder auch die Inspektion von Tiefsee-Bohrlöcher können mit Laufroboter am Meeresgrund deutlich effektiver und präziser erledigt werden als mit anderen Technologien. Der wirtschaftliche Nutzen solcher Roboter wäre direkt kalkulierbar und sieht sehr vielversprechend aus. Jedoch ist die Anzahl der weltweit benötigten Unterwasser-Laufroboter sehr begrenzt. Eine weitere, anspruchsvolle Aufgabe für mehrbeinige Laufroboter

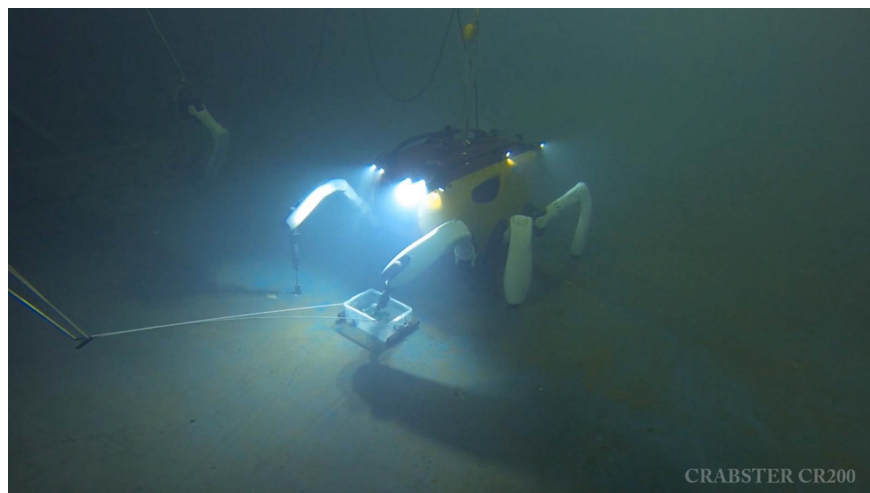


Bild 3.18.: Sechsheiniger Laufroboter *Crabster CR200* bei Versuchen in einem tiefen Wasserbecken. Quelle [234]

ist der Einsatz im Rahmen von Search-and-Rescue Missionen. Gerade die Suche nach verschütteten Personen in Trümmerfeldern ist eine Anwendung für die kleine, leichte Laufroboter sehr gut geeignet wären. Da es sich hierbei um humanitäre Einsätze handelt und die Innovationskraft in diesem Feld durch die komplexen Organisations-Strukturen leider beschränkt ist, wird es sehr schwierig hier erfolgreich Laufroboter zu kommerzialisieren. Eine andere aussichtsreiche Anwendung ist der Einsatz im Bereich der Land- und Forstwirtschaft. Der *Harvester* Prototyp von Plustech hat bereits vor vielen Jahren die technische Machbarkeit demonstriert[91]. Mit den Fortschritten im Bereich der Regelungs- und Steuerungstechnik, dem autonomen Fahren, Akku-Technologie und 3D-Umwelterfassung sind vollständig autonome Laufroboter denkbar, die umweltschonend Wälder forstwirtschaftlich nutzbar machen. Die Stärken dieser Systeme lägen vor allem

in Forstgebieten mit keinem oder schwierigem Zugang für radgetriebene Fahrzeuge wie z.B. Moore und Gebirge. Aber auch als Erntehelfer in Steillagen wie z.B. an Weinhängen ist der Einsatz solcher Kletter- und Laufroboter gut vorstellbar.

3.8. Diskussion zum Stand der Forschung

Der Blick auf den Stand der Forschung im Bereich mehrbeiniger Laufroboter zeigt eine beeindruckende Vielfalt an Technologien, Konzepten und sogar unterschiedlichen Forschungsdisziplinen, die sich dem Thema annähern. Die entwickelten Laufroboter unterscheiden sich entsprechend stark und machen einen Vergleich ihrer Leistungsfähigkeit äußerst schwierig. Ohne diese Vergleichbarkeit können jedoch auch überlegende Technologien, starke neue Konzepte oder einfach nur *Best Practices* nicht identifiziert werden. Es überrascht somit nicht, dass Forschungsgruppen ohne die Möglichkeiten des Wissenstransfers, in der Regel viele Jahre brauchen um neue, leistungsfähige Roboter zu entwickeln. In der Literatur finden sich dennoch Arbeiten, die Methoden und Konzepte entwickelt haben um mehrbeinige Laufroboter zu optimieren.

Die Optimierung der Kinematik eines Laufroboters sollte stets im Zusammenspiel mit der Bewegungserzeugung bzw. dem Steuerungskonzept erfolgen. Im Idealfall können die Laufmuster und Bewegungen als selbststabilisierende Zyklen aus der Kinematik extrahiert werden (*Emergenz* nach Pfeifer [169]). So lassen sich sehr effiziente und zugleich robuste Laufroboter entwickeln (*Embodiment*). Problematisch in der Anwendung der *Embodiment*- und *Emergenz*-Konzepte ist, dass diese bisher eher auf relativ einfache Kinematiken angewendet wurden. Die Anordnung der Beine am Zentralkörper oder auch die Segmentlängen der Bein kinematiken werden in den vorgestellten Arbeiten mit unterschiedlichen Ansätzen optimiert. Dabei unterscheiden sich die Verfahren stark und reichen von maschinellen Lernverfahren bis zu analytischen Arbeitsraumanalysen [86][19]. Dieses Vorgehen lässt sich auf viele Kinematiken anwenden und erlaubt auch die Kombination mehrerer Verfahren. Eine Herausforderung kann das Fehlen von allgemein zugänglichen Werkzeugen in diesem Bereich sein, so dass in der Praxis der Einsatz der Optimierungsverfahren sehr aufwändig ist. Oft werden die Kinematiken bisher auch zu stark von Technologien getrieben wie z.B. der Größe verfügbarer Motoren. Der detaillierte Blick auf die biologischen Vorbilder erlaubt es Robotersysteme zu entwerfen, die als Versuchsträger für Neurowissenschaftler und Biologen äußerst interessant sind [193] [118]. Diese Systeme bieten die Chance grundlegende Koordinationsmechanismen und das Zusammenspiel der Beine, den Muskeln mit dem Nervensystem zu verstehen. Hieraus können Konzepte zur Steuerung von Laufrobotern hergeleitet werden, die auf viele Systeme übertragen werden können wie z.B. die *Cruse Regeln* [54]. Eine direkte Übertragbarkeit der biomimetischen Kinematiken auf andere, allgemeine Laufroboter ist nur in Ausnahmefällen möglich und sinnvoll. Mehrbeinige Laufroboter eignen sich hervorragend um in schwierigem Gelände eingesetzt zu werden, da sie sich mit ihren flexiblen Beinen an jeden Untergrund anpassen können. Allerdings sollte für den geplanten Anwendungsbereich untersucht werden, ob die Kinematik hierfür auch geeignet ist. So erhielt der Laufroboter *TITAN VII* veränderliche Beinlängen, nachdem kinematische Analyse anhand einer Stabilitätsmetrik gezeigt hatten, dass der Roboter am Hang zwar stehen aber nicht gut laufen kann [97]. Solche kinematischen Optimierungen sollten vor der Entwicklung, spätestens jedoch vor dem Einsatz des Systems erfolgen um stets die Stabilität des Roboters garantieren zu können. Die Stabilität eines Laufroboters ist essentiell für dessen Einsatz in Anwendungen außerhalb des Labors. Überraschenderweise ist die Optimierung der Stabilität ein bisher selten untersuchtes Thema. Obwohl zahlreiche Metriken entwickelt wurden um die Stabilität zu bewerten, existieren nur

wenige Ansätze um diese auch zielgerichtet zu optimieren. Die Haltungskontrolle des *MESSOR* Roboters kann die Stabilität auch in schwierigem Gelände sicherstellen [23]. Die Entwicklung einer unabhängigen Haltungskontrolle kann als Konzept gut auf andere Systeme übertragen werden, die konkrete Umsetzung in diesem Falle jedoch nicht. Im Kontrast dazu wird die Optimierung der Energieeffizienz von Laufrobotern intensiv untersucht und weiterentwickelt. Sogenannte *Passive Dynamic Walker* sind ein Extrembeispiel für diese Optimierungen. Einige *Passive Dynamic Walker* wie z.B. *Ranger* erreichen bereits eine bessere Energieeffizienz als der Mensch [28][27]. Das liegt vor allem daran, dass bewusst selbststabilisierende, ausgeklügelte mechanische Systeme entwickelt werden, die extrem effizient laufen. Hier schließt sich der Kreis zu den Arbeiten von *Pfeifer et al.*, die dazu aufrufen diese intrinsischen Eigenschaften der Laufroboterkinematiken besser zu nutzen [169]. Die *Passive Dynamic Walker* zeigen zwar eindrucksvoll welche Potentiale in der Energieoptimierung stecken, die Konzepte lassen sich jedoch nur schwer auf andere Roboter übertragen. Mehrbeinige Laufroboter wie *RHex* oder *DASH* erreichen hohe Geschwindigkeiten und sehr gute Energieeffizienzwerte durch eine starke Reduktion der Freiheitsgrade [187][31]. Mit nur wenigen Motoren verbessert sich das Verhältnis aus Kraft zu Gewicht und damit automatisch auch die Effizienz. Die ungewöhnliche Antriebstechnik mit rotierenden Motoren ist zwar nicht biologisch motiviert, erzeugt aber eine Laufcharakteristik, die sehr nahe an biologischen Vorbildern wie der Kakerlake ist. Weiter laufen diese Systeme so schnell, dass aktive Flugphasen die Effizienz zusätzlich verbessern. Bei der Entwicklung neuer Laufroboter sollte geprüft werden, ob alternative Antriebskonzepte für den geplanten Anwendungsfall eingesetzt werden können. Die aktuell erfolgreichsten Laufroboter wie *SpotMini*, *ANYmal* oder auch der *MIT Cheetah 2* benutzen fortschrittliche, hochfrequente Regelungsstrategien um Laufbewegungen nach dem SLIP-Modell erzeugen [1][104][164]. Unabhängig davon, ob die Systeme mechanische Elastizitäten oder virtuelle Elastizitäten verwenden, spielt die Nachgiebigkeit und Adaptivität des Gesamtsystems eine entscheidende Rolle. Der Schlupf und die Kollisionen mit dem Untergrund werden minimiert. Die beeindruckenden Laufleistungen dieser dynamischen Vierbeiner belegen die Überlegenheit der kraftbasierten, dynamischen Lokomotionsstrategien. Bei der Entwicklung neuer, leistungsstarker Roboter müssen nicht nur effiziente Antriebe und kraftbasierte Regelungskonzepte sondern auch Elastizitäten eingesetzt werden.

Insgesamt konnten die vorgestellten Optimierungsansätze an vielen Stellen die Laufleistung der Roboter signifikant steigern. Nahezu alle Ansätze wurden jedoch für einen speziellen Laufroboter oder einen Laufrobotertyp (wie z.B. vierbeinig, sechsbeinig oder statisch stabil) konzipiert. Es fehlen weiterhin roboterunabhängige Vergleichsmöglichkeiten und Strategien die verschiedenen Ansätze kombinieren zu können. Im nächsten Kapitel sollen bekannte Metriken für Laufroboter untersucht werden um zu prüfen, ob es möglich ist die Leistungsfähigkeit trotz der Unterschiede objektiv zu erfassen. Außerdem liegt der Fokus dieser Arbeit nicht auf der Optimierung einer Fähigkeit, sondern auf der holistischen Betrachtung der Lokomotion. Im weiteren Verlauf werden deshalb stets die drei Aspekte Stabilität, Geschwindigkeit und Energieeffizienz betrachtet.

4. Modellbasierte Metriken für den Entwurf und die Optimierung

Sowohl Tiere und Insekten als auch moderne, rechnergestützte Laufroboter weisen eine unglaubliche Vielfalt auf, die es schwer macht diese Systeme miteinander zu vergleichen. Die natürlichen und künstlichen Vertreter unterscheiden sich in ihrer Form, Größe, Gewicht, Anzahl an Beinen, Gelenken und sogar der Lokomotionsprinzipien. Für die Entwicklung neuer Laufroboter oder der Optimierung bestehender Systeme ist es notwendig sich an den guten, effizienten Lösungen zu orientieren und die weniger ausgereiften Ansätze zu verwerfen. Um die Vielfalt an Varianten miteinander in Beziehung setzen zu können, wird in diesem Kapitel zunächst der aktuelle Stand der Forschung hinsichtlich Metriken für Laufroboter vorgestellt. Nach der Diskussion dieser Metriken wird ein Lokomotionsmodell zur Beschreibung mehrbeiniger Laufvorgänge entwickelt um anschließend neue, modellbasierte Metriken herzuleiten. Diese Metriken bilden die Basis für die abgeleiteten Analysen und Optimierungsverfahren in den nächsten Kapiteln.

4.1. Motivation und Herausforderungen

Um eine übertragbare Metrik für die mehrbeinige Lokomotion entwickeln zu können, müssen vor allem die Unterschiede zwischen den vielen Varianten so abstrahiert oder normiert werden, dass ein Vergleich möglich wird. Das zu entwickelnde Lokomotionsmodell muss um alle Varianten abbilden zu können, abstrakt sein und dennoch die wesentlichsten Kernelemente der mehrbeinigen Lokomotion beinhalten. Viele Kenngrößen von Laufrobotern, aber auch Tieren und Insekten, die im allgemeinen Sprachgebrauch verwendet werden, sind nicht eindeutig definiert. Die sich hieraus ergebenden Herausforderungen für eine systemunabhängige Normierung soll im Folgenden anhand der wichtigsten Kenngrößen kurz diskutiert werden.

Größe Die Größe eines laufendes Systems bezeichnet dessen dreidimensionale Ausdehnung (X_r, Y_r, Z_r) im Raum (Länge von Kopf bis Schwanz, maximale Breite und die Höhe von Kopf bis Fuß). Die Größe spielt eine ganz entscheidende Rolle bei laufenden Systemen. Es gibt zahlreiche weitere Eigenschaften bzw. Kenngrößen, die direkt oder zumindest indirekt durch die Größe beeinflusst werden. So hängen die Höhe und das Gewicht zum Beispiel unmittelbar von der Größe ab. Skaliert man in einem Gedankenexperiment eine Katze auf die doppelte Größe, so wächst das Gewicht theoretisch um den Faktor 8, da dieses vom Volumen abhängt. Allerdings ist die Größe oft nicht einfach bzw. nicht eindeutig zu bestimmen und führt direkt zu Ungenauigkeiten beim Vergleich der Systeme. Es stellt sich die Frage wie mit langen Extremitäten wie einem Schwanz bei einem Reptil oder hervorstehendem Sensoraufbauten bei einem Roboter umgegangen werden soll. Biologen verwenden verschiedene Fachkenngrößen wie z.B. die *Schulterhöhe* oder *Rumpflänge mit Kopf* um eine eindeutigere Bestimmung vornehmen zu können. Insgesamt ist die Vielzahl an Fachkenngrößen eher irreführend als hilfreich und bietet viel Potential für Fehler beim systemunabhängigen Vergleich verschiedener Lokomotionsprinzipien. Die Größe soll als Kenngröße somit nicht direkt in das zu entwickelnde Lokomotionsmodell übernommen werden.

Körperlänge Die Länge bzw. Körperlänge entlang der Vorwärtslaufrichtung (X-Dimension) ist eine Kenngröße, die direkt von der Größe abgeleitet werden kann. Um die Lokomotion zu beschreiben und später zu bewerten ist dies eine wichtige Größe, die jedoch auch nicht so einfach oder eindeutig zu ermitteln ist. Bei Reptilien werden z.B. oft Körperlängen mit und ohne Schwanz angegeben. Bei Säugetiere werden z.T. Rumpflänge verwendet und damit der Kopf bzw. Schwanz nicht zu betrachtet. Bei Gliederfüßern wie z.B. einer Spinne oder Stabheuschrecke ist die Körperlänge auch nicht einfach zu bestimmen. Hier stellt sich die Frage, ob z.B. der Abdomen¹ mit zur Körperlänge berücksichtigt werden soll oder nicht. In der Abb. 4.1 werden verschiedene biologische Vertreter sowie die Schwierigkeiten zur Bestimmung der Körperlänge anschaulich diskutiert. Die Körperlänge soll aufgrund der nicht eindeutigen Definition und der möglichen Probleme

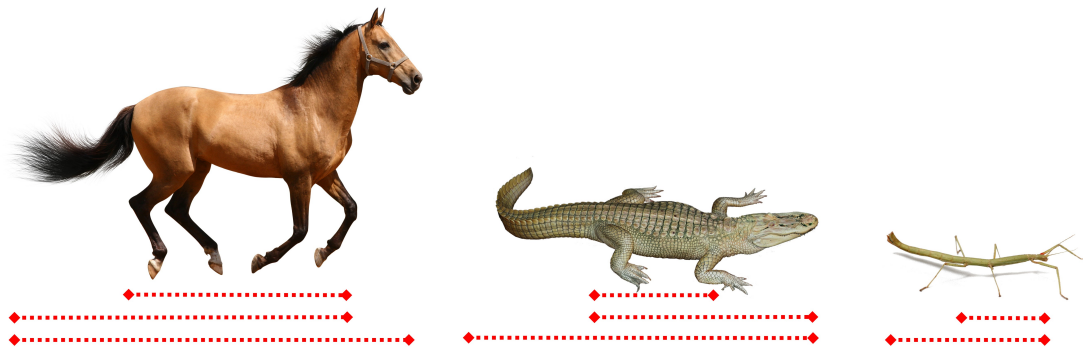


Bild 4.1.: Die Körperlänge ist oft nicht einfach und intuitive zu ermitteln: (links) Pferd: Rumpflänge vs. Rumpflänge mit Kopf vs. Gesamtlänge inklusive Schweif, (mittig) Krokodil: Rumpflänge vs. Rumpflänge mit Kopf vs. Gesamtlänge mit Schwanz, (rechts) Stabheuschrecke: Kopf mit Prothorax, Mesothorax und Metathorax vs. Gesamtlänge inklusive Abdomen.

bei der Erfassung nicht direkt in dem Lokomotionsmodell berücksichtigt werden. Allerdings werden später Hilfsgrößen definiert, über die die Körperlänge indirekt erfasst wird und so in das Lokomotionsmodell einfließt (siehe Abschnitt 4.3).

Höhe Die Höhe des Systems kann entweder als Z-Dimension der Größe aufgefasst werden (Kopfhöhe) oder wie in der Biologie als Schulterhöhe interpretiert werden. Insbesondere die Kopfhöhe spielt für die Lokomotion eigentlich eine untergeordnete Rolle. So hat zum Beispiel die Giraffe einen sehr langen Hals oder manche Laufroboter erhöhte Sensorträger um sich einen besseren Überblick zu verschaffen. Dies Extremitäten beeinflussen zwar den Schwerpunkt und somit die Stabilität und evtl. auch das daraus abgeleitete Laufmuster, jedoch ist dies eher ein indirekter Einfluss, der in dem Lokomotionsmodell anders berücksichtigt werden sollte. Die Schulterhöhe ist eine gute Kenngröße für größere Landsäugetiere wie Pferden oder Elefanten als Spitzengänger (siehe Abbildung 2.3). Bei kleineren Säugetieren, die ihre Beine stets angewinkelt haben wie der Spitzmaus (Sohलगänger), ist die Schulterhöhe auch bei Biologen bereits deutlich weniger gebräuchlich. Eine Übertragung auf Gliederfüßer zu denen Insekten, Spinnen und Krebstiere gehören, ist nicht einfach möglich. Da auch die Bestimmung der Höhe häufiger Schwierigkeiten bereitet bzw. sie für einige Arten gar nicht ermittelbar ist, soll die Höhe nicht direkt in das Lokomotionsmodell integriert werden.

¹Abdomen: Hinterleib bei Insekten

Gewicht Das Gewicht eines Tieres, Insektes oder einer Spinne ist eine Größe, die eindeutig ermittelt werden kann. Auch bei Robotersystemen ist diese Größe konstant und lässt sich zuverlässig und eindeutig erfassen. Das Gewicht wird in dieser Arbeit mit der SI-Einheit Kilogramm [kg] verwendet. Interessanterweise ist das Gewicht die Kenngröße, die bei laufenden Tieren und Insekten den größten Wertebereich abdeckt. In der Abbildung 4.2 ist zu erkennen, dass sich das Gewicht verschiedener Vertreter um mehr als 6 Größenordnungen unterscheiden kann [7]. Kleine Insekten wie z.B. Ameisen (*Monomorium pharaonis*) wiegen weniger als 1 Gramm, also $1 \cdot 10^{-3}$ kg und große Säugetiere wie der Elefant mehrere Tonnen, also $1 \cdot 10^3$ kg. Die Vielseitigkeit der kinematischen bzw. morphologischen Lokomotionsapparate, die sich den

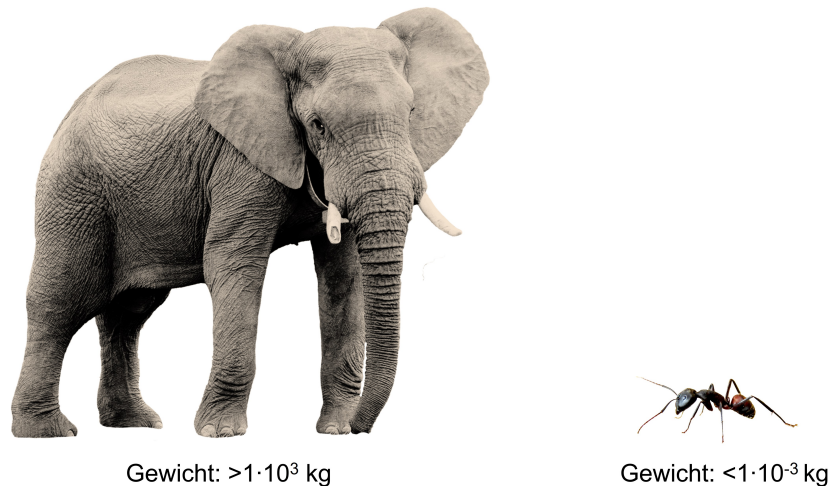


Bild 4.2.: Der Gewichtsvergleich großer Säugetiere mit kleinen Insekten zeigt wie groß die Vielfalt mehrbeiniger Lokomotion aussehen kann (Hinweis: die Größenverhältnisse in der Darstellung sind nicht richtig skaliert).

jeweiligen Gewichtsklassen über die Zeit optimal angepasst haben, ist sehr beeindruckend und inspirierend für Forscher und Entwickler von Laufrobotern. Das Gewicht hat einen großen Einfluss auf viele Faktoren wie die Stabilität, aber auch die Geschwindigkeit. Besonders die Energieeffizienz wird stark durch das Gewicht beeinflusst. Das Gewicht ist eine zentrale, wichtige Kenngröße, die direkt in das Lokomotionsmodell einfließen soll.

Beinlängen Die Beinlänge beschreibt die Länge von dem ersten, beweglichen Gelenk am Körper (normalerweise das Hüft- bzw. Schultergelenk) bis zum Bodenkontakt am Fuß. Bei Vertretern mit ausgestreckten Beinen, kann die Beinlänge als Kenngröße prinzipiell gut verwendet werden. Gerade bei Wirbeltieren wie der Spitzmaus (Vertebraten) werden die Beine jedoch häufig in einer vorgespannten Form genutzt um eine Art Feder bzw. Elastizität im Lokomotionsapparat zu erzeugen (siehe Abbildung 4.3).

Durch diese Federform verändert sich die effektive Beinlänge (euklidischer Abstand zwischen Schulter und Boden) während des Laufens. Auch Gliederfüßer wie Insekten (Arthropode) laufen mit nicht durchgestreckten Beinen, so dass sich die effektive Beinlänge deutlich von der morphologischen Beinlänge unterscheidet (siehe Abbildung 4.3). Die effektive Beinlänge stellt den Hebelarm zwischen dem Schultergelenk und dem Boden dar und kann zur Approximation des aufgebrachtten Drehmoments im Schultergelenk genutzt werden. Für das Lokomotionsmodell ist die Beinlänge eine wichtige Größe, sie wird allerdings nicht



Bild 4.3.: Die effektiven Beinlängen (rot gestrichelt) bei Vertebraten und Arthropoden unterscheiden sich stark von den normalen Beinlängen (grün).

direkt ins Modell übernommen, sondern wird später über Hilfsgrößen abstrahiert berücksichtigt (siehe Abschnitt 4.3).

Anzahl der Gelenke pro Bein Die Anzahl der Gelenke pro Bein variiert in der Natur vor allem zwischen den verschiedenen Arten wie Insekten, Spinnen, Krebstieren, Säugetieren und Reptilien. Die indische Stabheuschrecke, die ein sehr gut untersuchtes Insekt ist, hat z.B. vier Gelenke pro Bein [52]. Säugetiere wie z.B. Pferde haben 7 oder mehr Gelenke pro Bein [214]. Wenn man den Fuß wie bei Katzen oder Hunden dazu zählt, sind es ca. 20 weitere Gelenke pro Bein. Laufroboter besitzen in der Regel deutlich weniger Gelenke. Sehr einfache Laufroboter kommen mit einem Gelenk aus, komplexere Roboter wie *ARMAR-4* haben hingegen bis zu 7 Gelenke pro Bein [14]. Die Anzahl der Gelenke beeinflusst unter anderem welche Beinbewegungen (Schwing- und Stemmtrajektorien) ausgeführt werden können, ob Energie beim Laufen durch Elastizitäten zwischengespeichert werden kann und welche Laufmuster am effektivsten sind. Dennoch soll die Anzahl der Gelenke nicht direkt als Kenngröße in das Lokomotionsmodell einfließen, da die Komplexität der verschiedenen kinematischen Konzepte nicht im Vordergrund stehen soll. Insbesondere die konkrete Kinematik soll durch das Lokomotionsmodell bewusst abstrahiert werden.

Anzahl der Beinpaare Die Anzahl der Beinpaare ist eine der wichtigsten und meist verwendeten Kenngrößen für die Taxonomie von Laufrobotern (siehe Abbildung 2.1). Die Fortbewegungsprinzipien von zwei-, vier- oder sechsbeinigen Vertretern unterscheiden sich grundlegend. Für das hier entwickelte Modell spielt die Anzahl der Beine dennoch keine wesentliche Rolle. Ziel der Modellbildung ist es verschiedene Systeme vergleichbar zu machen und die Unterschiede zwischen den Lokomotionsprinzipien auf die Gemeinsamkeiten zu reduzieren. Im Lokomotionsmodell soll die Anzahl der Beinpaare entsprechend nur indirekt berücksichtigt werden. In dieser Arbeit werden nur Systeme mit vier oder mehr Beinen betrachtet.

4.2. Bekannte Metriken in der Forschung

In der Robotik, aber auch speziell für Laufroboter, gibt es einige Metriken, die von Forscher und Entwickler genutzt werden um deren Fähigkeiten und Leistungsmerkmale zu quantifizieren. Bevor in dem nächsten Abschnitt auf den Stand der Forschung im Bereich Laufroboter-Metriken eingegangen wird, soll an dieser Stelle zunächst noch eine allgemeine Definition einer *Metrik* erfolgen.

Metrik Der Begriff *Metrik* hat seinen Ursprung im Griechischem und bedeutet dort „Messung“. Eine *Metrik* definiert im allgemeinen eine wohldefinierte Methode zur Messung von Werten oder ein System von Kenngrößen. Im Bereich der Informatik definiert z.B. die Softwaremetrik nach IEEE Standard 1061 die Qualität eines Softwaremoduls und gibt diesem einen numerischen Zahlenwert. In dieser Arbeit beschreibt eine *Metrik* eine Methode um eine Fähigkeit oder Eigenschaft eines Laufroboters zu quantifizieren. Häufig werden in der Literatur *Metriken* auch Kriterien oder Messvorschriften genannt. Entscheidend dafür, ob diese auch als *Metrik* bezeichnet werden können, kann anhand der folgenden Eigenschaften ermittelt werden:

Definition Metrik:

- *Übertragbarkeit*: die Berechnungsvorschrift ist eindeutig definiert und kann für verschiedene Systeme angewendet werden
- *Determinismus*: die Berechnungsvorschrift enthält keine probabilistische Operatoren: bei gleichen Eingabedaten wird stets das gleiche Ergebnis ermittelt
- *Eindeutigkeit*: die Berechnungsvorschrift ermittelt einen klaren, eindeutigen Zahlenwert, anhand dessen leicht eine Güte abgeleitet und ein Vergleich durchgeführt werden kann

Im Weiteren werden *Metriken* aus der Literatur für die Key-Performance-Indikatoren Stabilität, Geschwindigkeit und Energieeffizienz vorgestellt und diskutiert.

4.2.1. Stabilitätsmetriken

Ein physikalisches System gilt als stabil, wenn keine Veränderungen stattfinden. Diese Definition lässt sich so nicht direkt auf Laufroboter übertragen, da es drei sehr unterschiedliche Zustände gibt. Im ersten Zustand steht der Roboter, bewegt sich nicht und verharrt an der gleichen Position. Hier lässt sich die obige Definition der Stabilität noch übertragen und einfach anwenden. Im zweiten Zustand läuft der Roboter nur langsam und hat stets mindestens drei Beine auf dem Boden. Bereits in diesem Zustand finden kontinuierlich Bewegungen und Veränderungen statt und die obige Definition ist nicht mehr direkt erfüllt. Im dritten Zustand läuft der Roboter schnell und hat weniger als drei Beine bzw. in aktiven Flugphasen sogar keine Beine auf dem Boden. Dieser äußerst dynamische Zustand lässt sich keinesfalls mit der obigen Definition als stabil klassifizieren. Aus diesem Grund wurden verschiedene Stabilitätskriterien entwickelt, die vor allem zwischen dem zweiten und dritten Zustand unterscheiden. Die Stabilitätskriterien werden hierzu in *statische* und *dynamische* Kriterien eingeteilt. Wobei der erste Zustand des stillstehenden Roboters, in der Regel von allen Kriterien abgedeckt werden kann. Im Allgemeinen gilt ein Laufroboter als stabil, wenn dieser sich in einem definierten Abstand zum Untergrund halten kann und keine ungewollten Kollisionen mit dem Untergrund oder der Umgebung stattfinden. Ein Laufroboter kann aus zwei Gründen instabil werden:

1. der Bodenkontakt eines Fußes geht verloren, weil der Fuß wegrutscht oder der Untergrund nachgibt; 2. der Roboter knickt zu einer Seite weg und kippt anschließend um. Alle in diesem Abschnitt vorgestellten Stabilitätskriterien konzentrieren sich auf den zweiten Fall. Der erste Fall wurde in der Literatur bisher nicht oder nur sehr ungeordnet betrachtet. In der Regel wird vorausgesetzt, dass der Fuß des Roboters einen sicheren Stand hat, nicht wegrutscht und der Untergrund nicht nachgibt. Auch in dieser Arbeit liegt der Fokus bei den Stabilitätsbetrachtungen auf dem zweiten Fall: dem potentiellen Umkippen des Roboters. Außerdem werden Sonderfälle, bei denen der Roboter seinen Körper bewusst ablegt oder wie ein Reptil bzw. größeres Insekt sogar mit der Bauchunterseite am Boden entlang schleift, nicht näher betrachtet. Im Folgenden werden die wichtigsten, statischen und dynamischen Stabilitätskriterien aus der Literatur vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird oft der Begriff *Stability Margin* verwendet. Dieser Fachbegriff ist oft Bestandteil der Namen der jeweiligen Stabilitätsmetriken und kann am besten mit Stabilitätsrand interpretiert werden. Damit ist der Abstand bis zur kritischen Stelle, an der der Roboter umkippt, definiert. Weitere Kriterien, die jedoch alle nur kleinere Abwandlungen oder Erweiterungen der hier vorgestellten Kriterien sind, können der Fachliteratur entnommen werden, z.B. den Arbeiten [79][96].

4.2.2. Statische Stabilitätskriterien

Static Stability Margin (SSM) Dieses Stabilitätskriterium wurde von *McGhee* zusammen mit einem der ersten modernen Laufroboter, dem sogenannten *Phony Pony*, bereits 1968 entwickelt [145]. Das Kriterium setzt voraus, dass der Roboter mit mindestens drei Beinen sicheren Bodenkontakt hergestellt hat. Die Fußpunkte werden zu einer konvexen Hülle, hier Aufstandsfläche genannt, verbunden (siehe auch Grundlagenabschnitt 2.4). Mit drei Bodenkontakten entsteht so z.B. ein Dreieck. Dann wird der Massenschwerpunkt des Laufroboters CoM_r ermittelt. Hierbei müssen auch die Massen der Beine mit deren aktuellen Gelenkwinkeln berücksichtigt werden. Anschließend wird der ermittelte Schwerpunkt entlang des Gravitationsvektors auf die Ebene der Aufstandsfläche projiziert. Um den Schnittpunkt des verlängerten Gravitationsvektors mit der Aufstandsfläche in der Praxis zu ermitteln, muss zunächst eine Ebene mit den Fußpunkten der Aufstandsfläche aufgespannt werden. Im letzten Schritt wird der kleinste Abstand dieses Schnittpunkts zu den Seiten der Aufstandsfläche ermittelt. Die *Static Stability Margin* ist der minimale geometrische Abstand zum Rand und wird in [m] oder [mm] angegeben. In vielen Fällen werden Vereinfachungen angenommen. Die Beine werden als masselos angenommen, da sie im Vergleich zum Zentralkörper nur einen kleinen Einfluss auf den CoM_r haben. Damit ist es nicht mehr notwendig in jedem Zeitschritt den CoM_r zu berechnen. Weiter wird oft angenommen, dass die Fußpunkte alle auf einer planaren Ebene liegen, so dass keine Ebenengleichung für die Aufstandsfläche aufgestellt werden muss. Wenn dann noch angenommen wird, dass der Roboter nicht auf Schrägen, sondern nur auf ebenen Untergrund läuft, ist die Berechnung der *Static Stability Margin* trivial. In der Abbildung 4.4 ist die Berechnung der *Static Stability Margin* beispielhaft dargestellt. Die *SSM* wurde ursprünglich für das Laufen auf ebenem Untergrund entwickelt. In diesen Umgebungen funktioniert sie sehr effektiv und wird auch heute noch von vielen Laufrobotern weltweit verwendet.

Eine leichte Abwandlung der *Static Stability Margin* ist die *Longitudinal Stability Margin (LSM)*. Wie bei der *SSM* wird ebenfalls die Aufstandsfläche gebildet und der zuvor ermittelte Schwerpunkt entlang des Gravitationsvektors projiziert. Im Gegensatz zur *SSM* wird bei der *Longitudinal Stability Margin* jedoch im letzten Schritt der Abstand des projizierten Schwerpunkts entlang der Laufrichtung betrachtet. Das Minimum der zwei Abstände in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung, unabhängig von der aktuellen Laufrichtung, ergibt abschließend den Zahlenwert der *LSM* (geometrischer Abstand zum Rand in [m] oder [mm]). Die

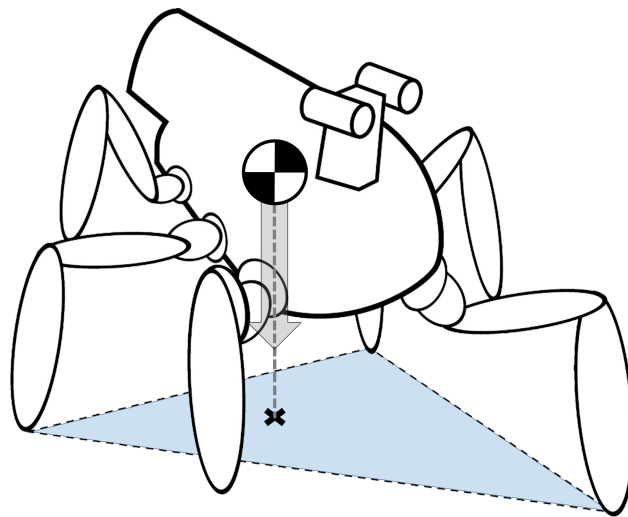


Bild 4.4.: *Static Stability Margin (SSM)* für mehrbeinige Laufroboter definiert klar und eindeutig die Stabilität für langsame Laufbewegungen auf einer Ebene.

Longitudinal Stability Margin konzentriert sich stärker auf die Laufbewegung, ist von der Berechnung her noch einfacher aber ansonsten der *SSM* sehr ähnlich. In der Abbildung 4.5 ist der jeweils letzte Berechnungsschritt für die *Static Stability Margin* (links) und die *Longitudinal Stability Margin* (rechts) dargestellt. Der Wert der *Longitudinal Stability Margin* ist stets größer oder gleich der *Static Stability Margin*.

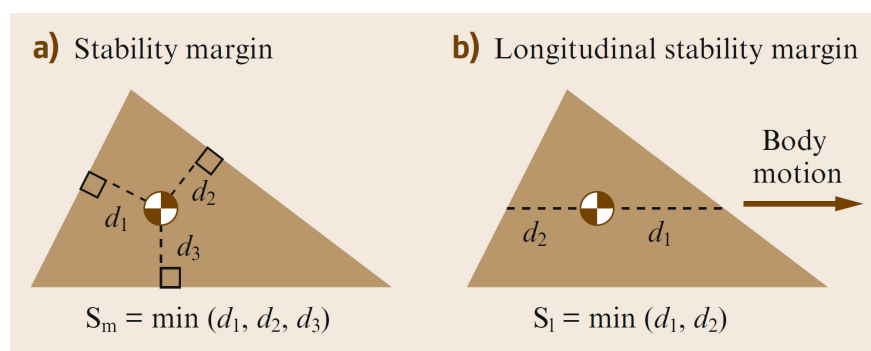


Bild 4.5.: Vergleich der *Static Stability Margin* (links) und der *Longitudinal Stability Margin* (rechts): Bei der *LSM* liegt der Fokus stärker auf der Laufbewegung. Quelle [203]

Energy Stability Margin (ESM) Ziel bei der Entwicklung der *Energy Stability Margin* war es ein Kriterium herzuleiten, das vor allem für schwieriges Gelände und Steigungen geeignet ist [148] und den Bediener eines Laufroboters dabei unterstützt, Fußpunkte sicher manuell zu wählen. Das klassische Stabilitätskriterium *SSM* nach *McGhee* ist ungeeignet für stark unebenes Gelände oder Steigungen. Wenn der Roboter wie in Abb. 4.7 angedeutet an einem Hang steht, ist laut *SSM* die Stabilität optimal, wenn sich der projizierte Schwerpunkt im geometrischen Mittelpunkt der Aufstandsfläche befindet. Zwar steht der Roboter mit dem Schwerpunkt innerhalb der Aufstandsfläche tatsächlich auch noch am Hang stabil, jedoch ist erkennbar, dass die Stellung des Zentralkörpers in Abb. 4.7 hinsichtlich der Stabilität nicht optimal ist. Deswegen erweiterten *Messuri und Klein* die *Static Stability Margin* zur *Energy Stability Margin (ESM)*, indem sie zunächst die Aufstandsfläche (konvexe Hülle aller Fußpunkte mit Bodenkontakt - siehe Abschnitt 2.4) um mehrere, virtuelle Kippachsen K_i ergänzt haben. Zwischen zwei Punkten (hier P_A und P_B) der Aufstands-

fläche entsteht jeweils eine Kippachse K_i (siehe Abbildung 4.6). Im nächsten Schritt muss in Abhängigkeit

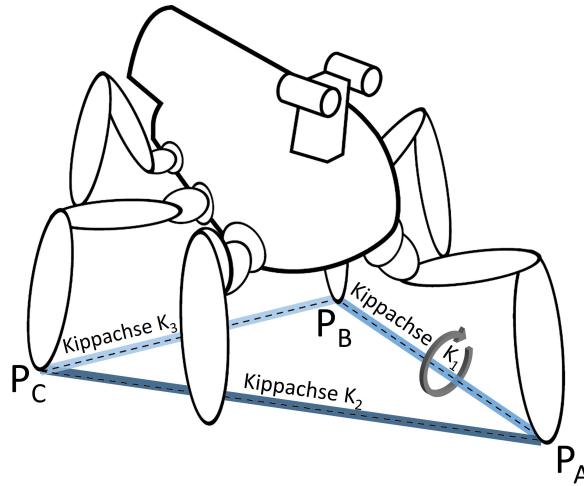


Bild 4.6.: Darstellung einer Aufstandsfläche mit den drei Kippachsen K_1 , K_2 und K_3 .

aller Gelenkwinkel der Schwerpunkt des Roboters CoM_r ermittelt werden. Jetzt wird die Stabilität jeder Kippachse anhand der potentiellen Energie ermittelt, die benötigt wird um den Schwerpunkt virtuell so lange um die Kippachse zu drehen, bis dieser direkt oberhalb der Kippachse liegt (siehe Abb. 4.8). Der Winkel der bis zu dieser Position überstrichen wird ist der sogenannte Kippwinkel θ . Im einfachen 2D-Fall, wie in Abb. 4.8, berechnet sich die Höhendifferenz h_i mit dem Kippwinkel θ wie folgt:

$$h_i = |R_i| - |R_i| \cdot \cos(\theta_i) \quad (4.1)$$

Wobei R_i der Vektor von der Kippachse i zum Schwerpunkt CoM_r ist, der orthogonal zur Kippachse i steht. Somit beschreibt $|R_i|$ den kürzesten Abstand zwischen der Kippachse i und dem Schwerpunkt CoM_r . Der zweite Teil der Gleichung berechnet die aktuelle Höhe des Schwerpunktes CoM_r in Relation zur Kippachse i mit $h_{CoM_i} = |R_i| \cdot \cos(\theta_i)$. Diese Berechnung wird für alle Kippachsen i wiederholt. Die gesuchte potentielle Energie E_i jeder Kippachse ergibt sich dann normiert mit dem Gewicht des Roboters m und der Fallbeschleunigung g zu:

$$E_i = m \cdot g \cdot h_i \quad (4.2)$$

Die *Energy Stability Margin* ESM ist der kleinste Wert aller berechneten potentiellen Energien E_i .

$$ESM = \min_i |E_i| \quad (4.3)$$

Das Kriterium berücksichtigt, dass ein niedriger Schwerpunkt sich positiv auf die Stabilität auswirkt. Für den dreidimensionalen Fall wird die Berechnung der benötigten potentiellen Energien etwas komplizierter, da die Kippachsen nicht mehr orthogonal zum Gravitationsvektor F_G stehen. Die Berechnung wird um den Winkel ψ erweitert, der den Winkel zwischen R und der Z-Komponente des Gravitationsvektors definiert. Die Gleichung wird entsprechend angepasst, so dass nur der Anteil entlang der Z-Komponente bei der Bestimmung der Höhe h_i berücksichtigt wird.

$$h_i = |R_i| \cdot (1 - \cos(\theta_i)) \cdot \cos(\psi) \quad (4.4)$$

Weitere Details zur Berechnung *Energy Stability Margin (ESM)* sowie eine Darstellung des Winkels ψ für den 3D-Fall finden sich in der Arbeit von *Messuri und Klein* [148]. Die *ESM* ist ein sehr häufig verwendetes Kriterium. Zahlreiche Abwandlungen und Varianten erweitern dieses Kriteriums um spezielle Aspekte oder

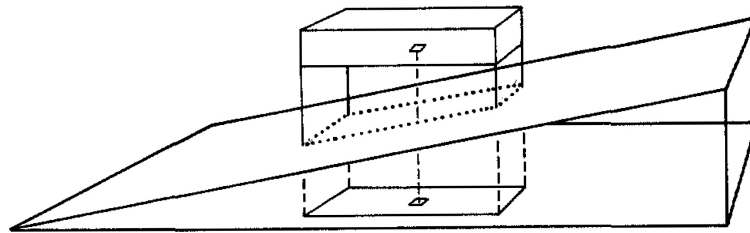


Bild 4.7.: Die *Energy Stability Margin* wurde entwickelt, weil die rein geometrische *Static Stability Margin* in Schräglagen keine zulässigen Werte ermittelt. Der in dieser Abbildung nach der *SSM* projizierte Schwerpunkt liegt in der Mitte der Aufstandsfläche. Somit wäre diese laut *SSM* die stabilste Stellung des Zentralkörpers. Es ist jedoch intuitiv klar, dass der Roboter in der Position leichter nach hinten als nach vorne kippen kann. Quelle [148]

Anforderungen besser erfassen zu können. *Ghasempoor und Sepehri* erweitern die *ESM* um auch inertielle sowie externe Kräfte berücksichtigen zu können [82]. Eine normalisierte und dynamische Erweiterung der *ESM* findet sich auch in der Arbeit von *Garcia und de Santos* [78]. Diese spezielle *Normalized Dynamic Energy Stability Margin (NDESM)* wird später noch detailliert vorgestellt. Bereits in einer früheren Arbeit normalisierten *Hirose et al.* die *ESM* anhand der Gewichtskraft des Roboters (mit der Masse des Roboters m und der Fallbeschleunigung g) [96].

$$NESM = \min_i \frac{|E_i|}{m \cdot g} \quad (4.5)$$

Motivation für diese Erweiterung von *Hirose et al.* war die Überlegung, dass der Einfluss der Masse bei der *ESM* zu stark ist. Ein schwerer Roboter ist nicht unbedingt stabiler, da dessen Kollisionen mit der Umgebung und resultierende Störimpulse ebenfalls mit der Masse des Roboters skalieren. Vorteil dieser Normierung ist, dass die *NESM* wieder einen geometrischen Abstand und keine Energie mehr beschreibt. Somit kann die *NESM* ähnlich zu der klassischen *SSM* verwendet werden.

$$NESM = \min_i \frac{|E_i|}{m \cdot g} = \min_i |h_i| \quad (4.6)$$

Ohne Berücksichtigung der Masse kann allerdings nicht der Einfluss externer Störkräfte sinnvoll unterschieden werden. Die *Normalized Energy Stability Margin (NESM)* wird, ähnlich wie die normale *ESM*, auch häufig bei Stabilitätsbetrachtungen von Laufrobotern eingesetzt.

4.2.3. Dynamische Stabilitätskriterien

Dynamic Stability Margin (DSM) Die *Dynamic Stability Margin (DSM)* ist eine direkte Erweiterung der *Static Stability Margin*. Mindestens drei Füße müssen einen sicheren Bodenkontakt haben um die Aufstandsfläche aufzuspannen. Nachdem der aktuelle Schwerpunkt des Roboters bestimmt wurde, wird dieser auf die Aufstandsfläche projiziert. Die Erweiterung der *Dynamic Stability Margin* ist, dass anstatt nur entlang des Gravitationsvektors zu projizieren, entlang des resultierenden Kraftvektors projiziert wird. Dieser Kraftvektor setzt sich aus dem Gravitationsvektors F_G , den Inertialkräften aus den Beschleunigungen des Roboters F_I sowie externer Störkräften F_E zusammen (siehe Abb. 4.9) Wenn der Abstand zum Rand der

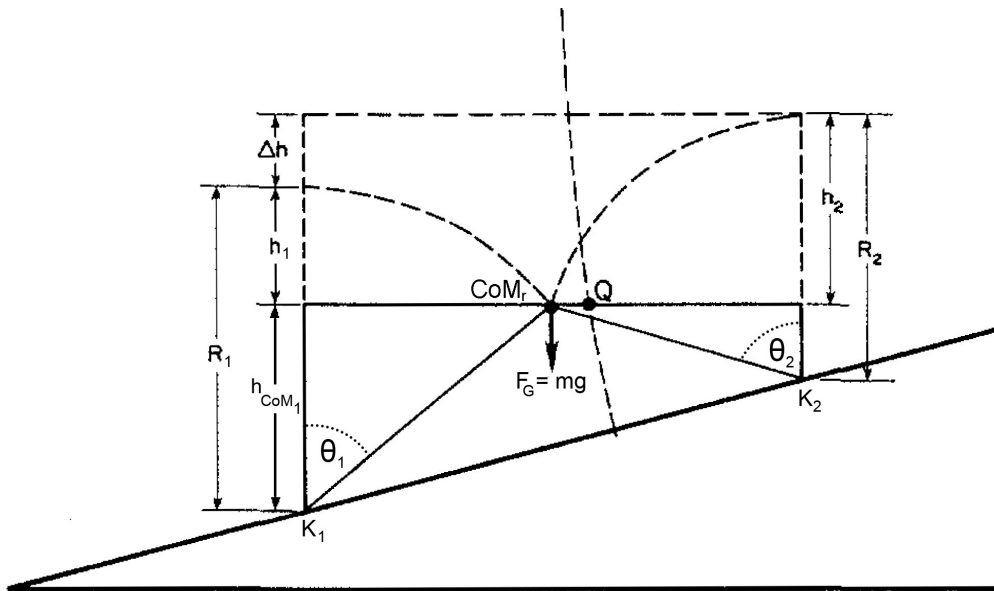


Bild 4.8.: Die *Energy Stability Margin* betrachtet die benötigte potentielle Energie um den Roboter entlang der Kippachse K_1 oder K_2 zu kippen. Der Höhenunterschied h_2 ist deutlich größer als h_1 und der Roboter kippt entsprechend leichter über die hintere Achse $\Delta h = h_2 - h_1$. Für die Berechnung der relevanten Höhen wird der jeweilige Kippwinkel θ_i und die Hilfsgrößen h_{CoM_i} benötigt. Nach *ESM* liegt die optimale Stellung des Schwerpunktes in diesem Fall entlang der gestrichelten Kurve Q . Der Gravitationsvektor F_G ist wichtig um den Kippwinkel zu bestimmen. Quelle (modifiziert) [148]

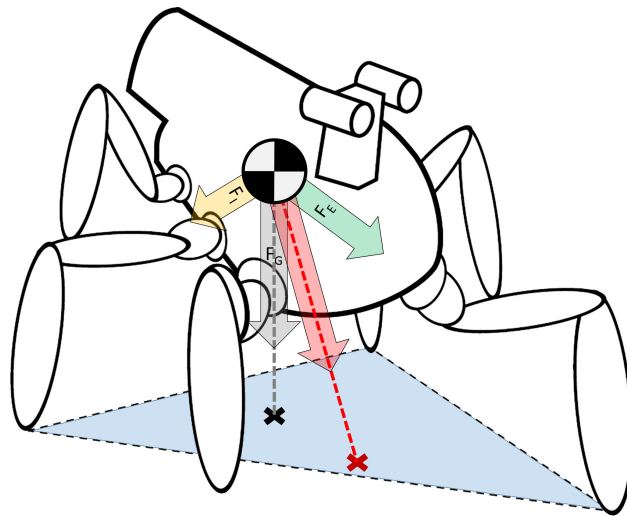


Bild 4.9.: Die *Dynamic Stability Margin (DSM)* ist eine einfache Erweiterung der *Static Stability Margin (SSM)*. Bei der *Dynamic Stability Margin* erfolgt die Projektion entlang des resultierenden Kraftvektors aus F_G , F_1 und F_E .

Aufstandsfläche groß genug ist, ist der Roboter entsprechend dynamisch stabil. Dieses direkt von der *SSM* abgeleitete Kriterium wird kurz in der Arbeit von *Lin und Song* beschrieben [138]. In dieser Arbeit entwickelten die Autoren noch ein weiteres dynamisches Stabilitätskriterium, bei dem die Drehmomente um mögliche Kippachsen des Roboters analysiert werden. Dieses Kriterium ist sowohl von der Herleitung, der Berechnungsvorschrift sowie Normierung bzgl. der Gewichtskraft identisch mit der *Tumble Stability Margin (TSM)*. Die *TSM* wird im nächsten Abschnitt beschrieben und hergeleitet.

Tumble Stability Margin (TSM) Die *Tumble Stability Margin (TSM)* betrachtet das Drehmoment, das entlang einer möglichen Kippachse benötigt wird, um den Roboter umkippen zu lassen [232]. Die Kippachse K_i ist definiert als die Achse zwischen den zwei Fußpunkten P_A und P_B . Das Kriterium berücksichtigt vor allem auch dynamische Effekte wie die inertialen Kräfte F_I und Momente M_I durch die Eigenbewegungen des Roboters. Bei langsamen Robotersystemen bzw. langsamen Bewegungen können diese vernachlässigt werden. Weiter werden die durch die Gewichtskraft erzeugten Kräfte F_G und Momente M_G betrachtet. Im Gegensatz zu vielen anderen Stabilitätskriterien werden auch externe Störkräfte F_E und Störmomente M_E berücksichtigt. Diese können zum Beispiel gewollt durch eine Manipulation der Umgebung (mit einem Bein oder Arm des Roboters) oder ungewollt durch extern einwirkende Kräfte von z.B. herabfallenden Steinen erzeugt werden. Ein wichtiger Schritt in der Berechnung der *Tumble Stability Margin* ist die Annahme, dass alle diese Kräfte und Momente von den Bodenreaktionskräften F_R bzw. den Momenten M_R kompensiert werden.

$$F_R = F_I - F_G - F_E \quad (4.7)$$

$$M_R = M_I - M_G - M_E \quad (4.8)$$

Jetzt wird ermittelt wie groß das resultierende Drehmoment durch diese Bodenreaktionskräfte F_R und Momenten M_R entlang der möglichen Kippachsen K_i des Roboters ist. Bei einem vierbeinigen Laufroboter mit vier Bodenkontakte müssen sechs Kippachsen und bei einem Sechsbewer bis zu 15 Kippachsen untersucht werden. Die Kippachse K_i wird durch die zwei Fußpunkte P_A und P_B definiert. Somit ergibt sich der normierte Richtungsvektor der Kippachse \hat{K}_i mit der folgenden Gleichung:

$$\hat{K}_i = \frac{(P_A - P_B)}{|P_A - P_B|} \quad (4.9)$$

Der hierzu orthogonale normierte Richtungsvektor kann einfach über das Kreuzprodukt der beiden Fußpunkt ermittelt werden.

$$\hat{T}_i = \frac{(P_A \times P_B)}{|P_A - P_B|} \quad (4.10)$$

Alle auf die Kippachse K_i wirkenden Drehmomente können jetzt mit diesen beiden Richtungsvektoren anschaulich hergeleitet werden. Zum einen müssen die Drehmomente M_R die entlang des normierte Richtungsvektor der Kippachse \hat{K}_i wirken berücksichtigt werden. Zum anderen müssen die Anteile der Kräfte F_R , die als Momente auf die Kippachse K_i über den orthogonale Richtungsvektor \hat{T}_i einfließen, bestimmt werden. Hieraus ergibt sich die Funktion zur Berechnung der Kippmoment M_i für die Kippachse K_i :

$$M_i = M_R \cdot \hat{K}_i + F_R \cdot \hat{T}_i = M_R \cdot \frac{(P_A - P_B)}{|P_A - P_B|} + F_R \cdot \frac{(P_A \times P_B)}{|P_A - P_B|} \quad (4.11)$$

Die *Tumble Stability Margin TSM* ist der Betrag des kleinsten Kippmoments normiert anhand der Gewichtskraft mit der Masse des Roboter m und der Fallbeschleunigung g .

$$TSM = \min_i \left| \frac{M_i}{mg} \right| \quad (4.12)$$

Werden die inertialen sowie externen Kräfte und Momente nicht berücksichtigt, handelt es sich hierbei um ein statisches Stabilitätskriterium. Für weitere Details zu der *Tumble Stability Margin* wird an dieser Stelle auf die Arbeit von *Yoneda und Hirose* verwiesen [232].

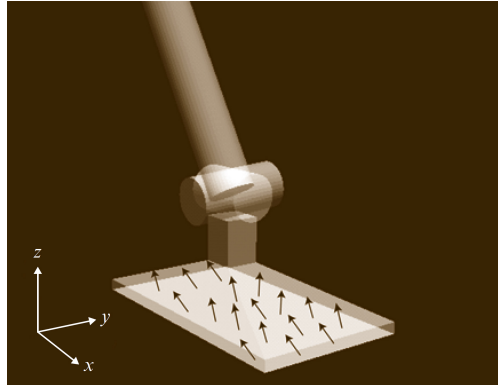


Bild 4.10.: Kontaktpunkte P_i übertragen Kräfte F_i vom Boden auf den Roboter. Quelle [203]

Zero Moment Point Kriterium (ZMP) Eines der bekanntesten Stabilitätskriterien in der Robotik ist der sogenannte *Zero Moment Point (ZMP)*. Dieser wird vor allem für zweibeinige Laufroboter eingesetzt, ist aber mit seinem allgemeinen Ansatz nicht hierauf beschränkt. Der *ZMP* wurde bereits Ende der 1960er Jahre von *Vukobratović et al.* entwickelt [220]. Im Jahr 1984 wurde die praktische Relevanz durch den zweibeinigen *WABOT* erfolgreich demonstriert [229]. Zur Herleitung des *ZMP* wird davon ausgegangen, dass zunächst ein Fuß durch entsprechend hohe Reibung sicher auf dem Boden steht. Der Fuß berührt an zahlreichen Punkten P_i den Untergrund. Jeder dieser Bodenkontaktpunkte P_i überträgt eine Kraft F_i mit Komponenten in allen drei Dimensionen $F_i = [F_{ix}, F_{iy}, F_{iz}]^T$ vom Untergrund auf den Fuß (siehe Abbildung 4.10). Der *ZMP* ist definiert als der Punkt, in dem alle Kontaktpunkte und Kräfte zusammengefasst werden können, die den Roboter tragen (nur Betrachtung der Kräfte in Z-Richtung):

$$P_{ZMP} := \frac{\sum_{i=1}^N P_i \cdot F_{iz}}{\sum_{i=1}^N F_{iz}} \quad (4.13)$$

Das resultierende Drehmoment am *ZMP* ergibt sich damit mit dem Hebelarm $P_i - P_{ZMP}$ und der Kraft F_i über das Kreuzprodukt zu:

$$M_{ZMP} = \sum_{i=1}^N (P_i - P_{ZMP}) \times F_i \quad (4.14)$$

Dies lässt sich auch für alle drei Dimensionen einzeln betrachten:

$$M_{ZMP_x} = \sum_{i=1}^N (P_{iy} - P_{ZMP_y}) \cdot F_{iz} - \sum_{i=1}^N (P_{iz} - P_{ZMP_z}) \cdot F_{iy} \quad (4.15)$$

$$M_{ZMP_y} = \sum_{i=1}^N (P_{iz} - P_{ZMP_z}) \cdot F_{ix} - \sum_{i=1}^N (P_{ix} - P_{ZMP_x}) \cdot F_{iz} \quad (4.16)$$

$$M_{ZMP_z} = \sum_{i=1}^N (P_{ix} - P_{ZMP_x}) \cdot F_{iy} - \sum_{i=1}^N (P_{iy} - P_{ZMP_y}) \cdot F_{ix} \quad (4.17)$$

Anhand der Annahme das alle Fußpunkte auf einer Ebene liegen folgt:

$$P_{iz} - P_{ZMP_z} = 0 \quad (4.18)$$

Damit ergeben sich die folgenden Gleichungen für die Kippmomente M_{ZMP_x} und M_{ZMP_y} :

$$M_{ZMP_x} = \sum_{i=1}^N (P_{iy} - P_{ZMP_y}) \cdot F_{iz} = \sum_{i=1}^N P_{iy} \cdot F_{iz} - \sum_{i=1}^N P_{ZMP_y} \cdot F_{iz} \quad (4.19)$$

$$M_{ZMP_y} = - \sum_{i=1}^N (P_{ix} - P_{ZMP_x}) \cdot F_{iz} = - \sum_{i=1}^N P_{ix} \cdot F_{iz} + \sum_{i=1}^N P_{ZMP_x} \cdot F_{iz} \quad (4.20)$$

Im Allgemeinen verschwindet das Drehmoment entlang der vertikalen Z-Achse M_{ZMP_z} aufgrund von Reibungskräften in F_x und F_y nicht: $M_{ZMP_z} \neq 0$. Bei der Stabilitätsbetrachtung anhand des ZMP interessieren jedoch vor allem die potentiellen Kippmomente M_{ZMP_x} und M_{ZMP_y} , die den Roboter zu Fall bringen könnten. Mit der Gleichung 4.13 ergibt durch Einsetzen für M_{ZMP_x} und M_{ZMP_y} .

$$M_{ZMP_x} = \sum_{i=1}^N P_{iy} \cdot F_{iz} - \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{i=1}^N P_{iy} \cdot F_{iz}}{\sum_{i=1}^N F_{iz}} \cdot F_{iz} = \sum_{i=1}^N P_{iy} \cdot F_{iz} - \sum_{i=1}^N P_{iy} \cdot F_{iz} = 0 \quad (4.21)$$

$$M_{ZMP_y} = - \sum_{i=1}^N P_{ix} \cdot F_{iz} + \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{i=1}^N P_{ix} \cdot F_{iz}}{\sum_{i=1}^N F_{iz}} \cdot F_{iz} = - \sum_{i=1}^N P_{ix} \cdot F_{iz} + \sum_{i=1}^N P_{ix} \cdot F_{iz} = 0 \quad (4.22)$$

Aus diesem Grund heißt der Punkt P_{ZMP} auch *Zero Moment Point*. Solange der Punkt P_{ZMP} innerhalb der Aufstandsfläche liegt, ist das System stabil. Mit diesen Gleichungen kann zum einen überprüft werden, ob der Roboter zum aktuellen Zeitpunkt noch stabil ist, zum anderen können sie dazu verwendet werden den P_{ZMP} über die aktive Regelung des Roboters innerhalb der Aufstandsfläche zu halten. So können sichere Laufmuster und Bewegungen für zwei- und mehrbeinige Laufroboter ermittelt werden. Weitere Details zur Herleitung und Anwendung des *Zero Moment Point* Kriteriums können den folgenden Arbeiten entnommen werden [203][220].

Konkrete Implementierungen des ZMP werden vor allem für humanoide, zweibeinige Laufroboter eingesetzt. Der ZMP kann aber auch auf mehrbeinige Laufroboter übertragen werden. *Zhang et al.* entwickelten ein sehr stabiles Laufmuster für einen vierbeinigen Laufroboter auf Basis des ZMP [237]. Allerdings wurde der ZMP vor allem für flaches, ebenes Gelände entwickelt. Entsprechend ist sein Einsatz für mehrbeinige Laufroboter z.T. etwas schwierig. Der *Center of Pressure (CoP)* ist ein weiteres, ähnliches Kriterium um

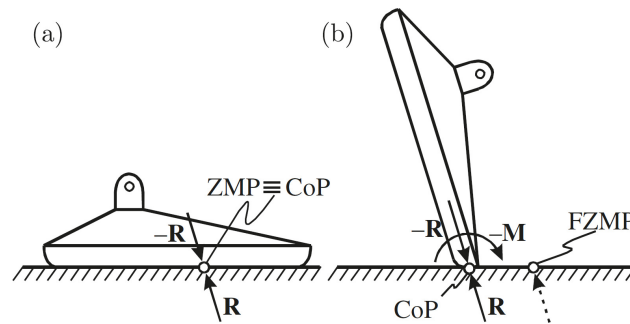


Bild 4.11.: Vergleich *Zero Moment Point (ZMP)* und *Center of Pressure (CoP)*. Quelle [220]

Laufroboter zu stabilisieren. Dieser Punkt P_{CoP} wird sehr ähnlich wie der ZMP hergeleitet (siehe ausführ-

liche Herleitung in der Arbeit von *Orin* [160]). In den meisten Fällen sind der *CoP* und der *ZMP* sogar identisch und fallen auf den gleichen Punkt (siehe links in Abbildung 4.11). In der Arbeit von *Vukobratovic* wird jedoch gezeigt, dass es nicht immer einen *ZMP* gibt, da der Punkt für $M_x = 0$ und $M_y = 0$ auch außerhalb der Aufstandsfläche liegen kann [220]. Dies geschieht z.B. wenn der Roboter instabil wird und kippt (siehe rechts in Abbildung 4.11). Dann existiert kein *ZMP*, sondern nur ein *fiktiver ZMP (FZMP)*, da der *ZMP* laut Definition innerhalb der Aufstandsfläche liegen muss. Der *CoP* ist stets definiert, so dass es Fälle gibt in denen die beiden Kriterien formal nicht identisch sind.

Force Angle Stability Margin (FASM) Die *Force Angle Stability Margin* wurde entwickelt um schnell und effektiv die Stabilität von Fahrzeugen und Robotern zu überwachen, die einen sehr hohen Schwerpunkt haben, externe Störkräfte erfahren und in schwierigem, steilen Gelände eingesetzt werden [162]. Um die *FASM* berechnen zu können, müssen folgende Messdaten von dem System verfügbar sein: die Punkte mit Bodenkontakt P_i , Massenschwerpunkt des Gesamtsystems CoM_r , externe Kräfte und Momente, die auf das System wirken, sowie alle inertialen Drehmomente und Kräfte durch Eigenbewegungen. In dem einfachen 2D-Fall kann die *FASM* am besten erklärt und hergeleitet werden. In der Abbildung 4.12 steht das System

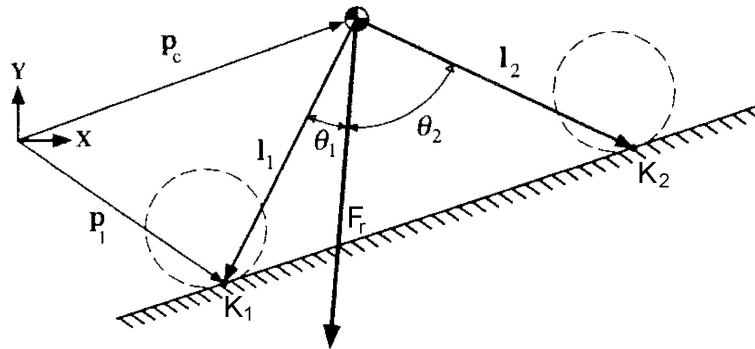


Bild 4.12.: Grundprinzip der *Force Angle Stability Margin*. Quelle (modifiziert) [162]

mit den Kippachsen K_1 und K_2 (in 2D sind es nur Punkte) an einem Hang. Übertragen auf den 3D-Fall wären dies die Kippachsen, die jeweils durch zwei Punkte pro Kippachse aufgespannt werden. Zu Beginn muss der aktuelle Schwerpunkt des Systems ermittelt werden. Hierbei müssen auch alle Gelenkstellungen von eventuellen Aufbauten oder zusätzlichen Manipulatoren berücksichtigt werden. Der resultierende Kraftvektor F_r , der sich aus der Gewichtskraft, aber auch den anderen Kräften und Momenten zusammensetzt, wird vom Schwerpunkt aus betrachtet. Dann wird der Schwerpunkt mit dem Kippunkt bzw. später in 3D mit der Kippachse durch den Vektor l_i verbunden. Entscheidend ist jetzt die Berechnung des *Kippwinkels* θ_i zwischen dem Vektor F_r und den jeweiligen Vektoren l_i zu den verschiedenen Kippunkten bzw. Kippachsen (siehe Abbildung 4.12). Die *Force Angle Stability Margin* wird für die Kippachse i wie folgt definiert:

$$FASM_i = \theta_i \cdot |F_r|. \quad (4.23)$$

Der Betrag des resultierenden Kraftvektors F_r ist genauso Bestandteil des Kriteriums wie der *Kippwinkel* θ . Das bedeutet, dass ein leichterer Roboter weniger stabil ist, ebenso wie ein Roboter bei dem eine Kraft entgegen der Gewichtskraft wirkt. Wenn die $FASM_i \leq 0$ wird, ist das System entlang dieser Kippachse K_i instabil. Das Stabilitätskriterium kann gut den negativen Einfluss eines hohen Schwerpunktes erfassen (siehe Abbildung 4.13). Der allgemeine, dreidimensionale Fall ist etwas schwieriger herzuleiten, da die

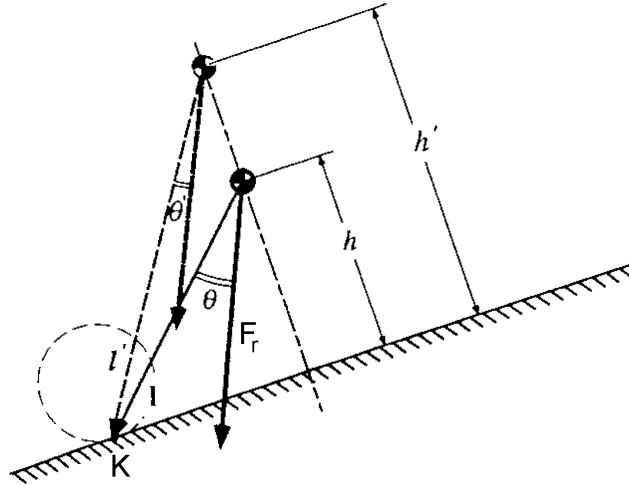


Bild 4.13.: Die *Force Angle Stability Margin* erfasst gut den negativen Einfluss eines erhöhten Schwerpunktes durch die Veränderung des Kippwinkels θ . Quelle (modifiziert) [162]

Berechnung des Kippwinkels θ_i einige Zwischenschritte erfordert. Zunächst werden hierzu die normierten Kippachsen \hat{K}_i wie folgt definiert:

$$\hat{K}_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{|P_{i+1} - P_i|} \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (4.24)$$

$$\hat{K}_n = \frac{P_1 - P_n}{|P_1 - P_n|} \quad (4.25)$$

Damit sind die Kippachsen K_i normierte Einheitsvektoren \hat{K}_i und werden als Richtungsvektoren verwendet. Dann muss der zu der normierten Kippachse \hat{K}_i orthogonale Vektor l_i bestimmt werden. Hierfür werden zwei Transformation-Matrizen erstellt, die eine Abbildung entlang der Kippachse K_i oder orthogonal zur Kippachse erzeugen. Die Matrix A zur Abbildung entlang der Kippachse ist definiert durch:

$$A = \hat{K}_i \hat{K}_i^T \quad (4.26)$$

Die Matrix B zur orthogonalen Abbildung wird mit der 3x3 Einheitsmatrix I wie folgt berechnet.

$$B = I - A = I - \hat{K}_i \hat{K}_i^T \quad (4.27)$$

Jetzt kann einfach der orthogonale Vektor l_i hergeleitet werden, der durch den Schwerpunkt P_{CoM} geht:

$$l_i = (I - A)(P_{i+1} - P_{CoM}) = (I - \hat{K}_i \hat{K}_i^T)(P_{i+1} - P_{CoM}) \quad (4.28)$$

Wobei der Punkt P_{i+1} laut vorheriger Definition auf der Kippachse K_i liegen muss. Anschließend kann der resultierende Kraftvektor F_{CoM_i} im Schwerpunkt des Roboters mit den Anteilen der Kräfte, die auf die Kippachse K_i wirken, bestimmt werden. Hierzu können zunächst die bekannten, resultierenden Kräfte F_R und Drehmoment M_R , die auf den Schwerpunkt insgesamt wirken, entsprechend umgerechnet und ihr Anteil als Kraft F_i sowie Moment M_i für die jeweilige Kippachse K_i ermittelt werden:

$$F_i = (I - A) \cdot F_R = (I - \hat{K}_i \hat{K}_i^T) \cdot F_R \quad (4.29)$$

$$M_i = A \cdot M_R = (\hat{K}_i \hat{K}_i^T) \cdot M_R \quad (4.30)$$

Wobei F_R und M_R als resultierenden Kräfte und Momente auch die Gravitationseffekte, externe Störeinflüsse und inertielle Effekte enthalten. Die Kräfte F_i bilden nur einen Teil des gesuchten Kraftvektor F_{CoM_i} im Schwerpunkt. Jetzt müssen die Drehmomente M_i noch in Kräfte im Schwerpunkt umgerechnet werden (mit $\hat{l}_i = l_i/|l_i|$)

$$F_{M_i} = \frac{\hat{l}_i \times M_i}{|l_i|} \quad (4.31)$$

Im nächsten Schritt erhält man so den vollständigen resultierenden Kraftvektor F_{CoM_i} im Schwerpunkt mit den Anteilen aller Momente und Kräfte, die auf die Kippachse K_i wirken. Dieser Vektor war im einfachen 2D-Fall (siehe oben) nur F_r und ergibt sich für den allgemeinen, komplexeren 3D-Fall aus der Gleichung:

$$F_{CoM_i} = F_i + \frac{\hat{l}_i \times M_i}{|l_i|} \quad (4.32)$$

Mit der Bestimmung dieser auf die Kippachse K_i wirkenden Kraft kann jetzt im letzten Schritt endlich der Kippwinkel θ_i berechnet werden. Mit Hilfe des Skalarproduktes zweier Vektoren kann der eingeschlossene Winkel θ_i bestimmt werden (mit $\hat{F}_{CoM_i} = F_{CoM_i}/|F_{CoM_i}|$):

$$\theta_i = \sigma_i \cos^{-1}(\hat{F}_{CoM_i} \cdot \hat{l}_i) \quad i = 1, \dots, n \quad (4.33)$$

Das Vorzeichen des Winkels wird über eine gesonderte Gleichung hergeleitet:

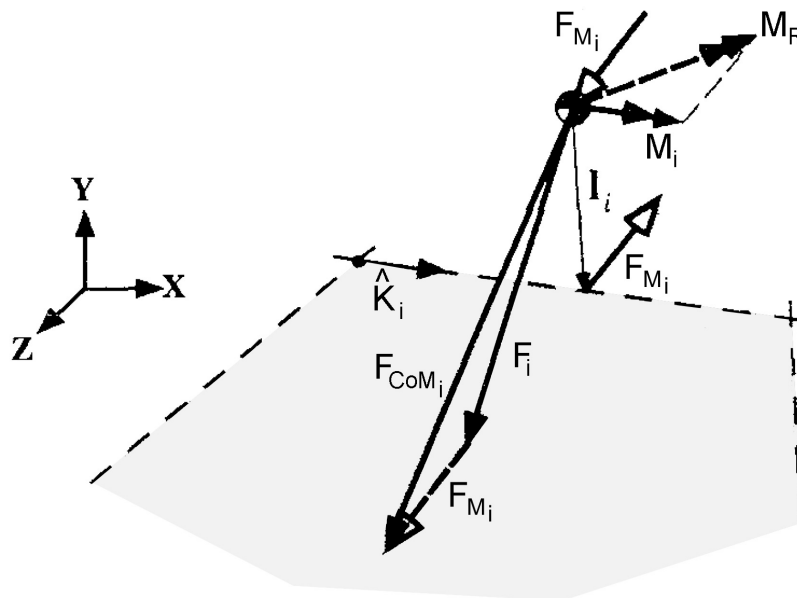


Bild 4.14.: Die Berechnung der *Force Angle Stability Margin* im allgemeinen 3D-Fall bedarf einiger geometrischer Vorberechnungen. Quelle (modifiziert) [162]

$$\sigma_i = \begin{cases} +1 & (\hat{l}_i \times \hat{F}_{CoM_i}) \cdot \hat{K}_i < 0 \\ -1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.34)$$

Diese längere, geometrische Herleitung ergibt, wie bisher bei dem 2D-Fall auch, die Stabilität nach *Force Angle Stability Measure (FASM)* für die Kippachse K_i :

$$FASM_i = \theta_i \cdot |F_r| \quad (4.35)$$

Bei der Berechnung der *FASM* handelt es sich effektiv nur um einfache Matrix- und Vektormultiplikation sowie eine trigonometrische Funktion, so dass die *FASM* problemlos auch online auf einem Onboard-PC ermittelt werden kann. In der Abbildung 4.14 sind die geometrischen Zusammenhänge zur Herleitung der *FASM* im 3D-Fall veranschaulicht. Die eigentliche *FASM* Stabilität für den Gesamtroboter wird als Minimum aller Kippachsen ermittelt. Es ist jedoch vorteilhaft stets alle Werte zu berechnen und auszuwerten um mögliche Kippgefahren entlang aller Achsen frühzeitig erkennen zu können.

Normalized Dynamic Energy Stability Margin (NDESM) Die klassische *ESM* bestimmt die benötigte Energie, die eine Kollision oder eine externe Störung besitzen muss, um den Roboter instabil werden zu lassen. Die *NDESM* erweitert dieses Kriterium um dynamische Effekte wie inertielle Kräfte F_I und Momente M_I durch positive und negative Beschleunigungen des Roboters sowie externe Störkräfte F_E und Momente M_E z.B. durch die Manipulation der Umgebung mit einem Arm oder Bein [78]. Dabei werden im Gegensatz zur Erweiterung der *ESM* durch *Ghasempoor und Sepehri* [82] auch inertielle Effekte durch die Bewegung der Beine berücksichtigt. Wie bei der *ESM* werden zunächst die Kippachsen K_i betrachtet und der Betrag der benötigten Energie E_i berechnet um den Schwerpunkt virtuell entlang einer Kreisbahn mit dem Radius $|R_i|$ über die Kippachse zu drehen (siehe Abbildung 4.8).

$$NDESM = \min_i \left(\frac{|E_i|}{m \cdot g} \right) \quad (4.36)$$

Dabei werden wieder die Masse m des Roboters sowie die Fallbeschleunigung g zur Normierung verwendet. E_i beinhaltet allerdings nicht mehr nur die potentielle Energie E_{pot} , sondern ebenso die Differenz der kinetischen E_{kin} . Für beide Anteile werden die Differenzen der Energien zwischen der ursprünglichen Position des Schwerpunkts P_{CoM_1} bei Winkel θ_1 und dem rotierten Schwerpunkt P_{CoM_2} mit θ_2 , der gerade oberhalb der Kippachse liegt und instabil wird, betrachtet.

$$E_i = E_{pot_2} - E_{pot_1} + E_{kin_2} - E_{kin_1} \quad (4.37)$$

Im Gegensatz zur *ESM* werden stets alle einwirkende Kräfte und Momente betrachtet. Somit ergibt sich für die Differenz der potentiellen Energien:

$$E_{pot_2} - E_{pot_1} = \Delta E_G + \Delta E_F + \Delta E_M \quad (4.38)$$

Dabei definiert ΔE_G die Differenz der durch die Gravitation verursachten Energien. Die ΔE_F und ΔE_M entstehen aus dem resultierenden Kraftvektor F_R bzw. dem resultierenden Moment M_R . Allerdings muss wie bei der *FASM* oder *ESM* noch der Anteil dieser Effekte auf die jeweilige Kippachse K_i berechnet werden. Die erste Energiedifferenz ΔE_G entspricht dem Wert der ursprünglichen *ESM* und kann einfach über die berechnete Höhendifferenz Δh in Abhängigkeit der Fallbeschleunigung g und Masse m ermittelt werden:

$$\Delta E_G = m \cdot g \cdot \Delta h \quad (4.39)$$

Die beiden weiteren Energiedifferenzen setzen sich wie folgt zusammen. Zunächst muss die normierte Kippachse \hat{K}_i mit den zwei Punkten P_A und P_B bestimmt werden:

$$\hat{K}_i = \frac{P_A - P_B}{|P_A - P_B|} \quad (4.40)$$

Da der Einfluss der Gravitation bereits in der ersten Energiedifferenz ΔE_G berücksichtigt wurde, darf diese hier nicht erneut einfließen und muss entsprechend vom resultierenden Kraftvektor F_R abgezogen werden. So ergibt sich die Energiedifferenz ΔE_F , die auf die Kippachse K_i über den Hebelarm R wirkt zu:

$$\Delta E_F = \int_{\theta_1}^{\theta_2} ((F_R - F_G) \times R) \cdot \hat{K}_i d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} ((F_R - F_G) \times R) \cdot \frac{(P_A - P_B)}{|P_A - P_B|} d\theta \quad (4.41)$$

Die Momente, die auf die Kippachse K_i anteilig wirken werden in der letzten Energiedifferenz ΔE_M erfasst:

$$\Delta E_M = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (M_R \cdot \hat{K}_i) d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (M_R \cdot \frac{(P_A - P_B)}{|P_A - P_B|}) d\theta \quad (4.42)$$

Damit sind alle potentiellen Energien in Gleichung 4.37 berechnet. Bei der Stabilitätsbetrachtung reicht es aus, wenn der Schwerpunkt oberhalb der Kippachse zum Stehen kommt um das System instabil werden zu lassen. Aus diesem Grund wird angenommen, dass die kinetische Energie in diesem zweiten Punkt P_{CoM_2} Null ist ($E_{kin_2} = 0$). Die kinetische Energie im ersten Punkt ergibt sich aus der Winkelgeschwindigkeit des Schwerpunkts

$$E_{kin_1} = \frac{1}{2} I_i \omega_i^2 \quad (4.43)$$

mit dem Trägheitsmoment I_i entlang der Kippachse K_i und der Winkelgeschwindigkeit des Schwerpunktes ω , die von dem inertialen Moment M_I abhängt. Das System ist stabil, wenn die Momente M_i (im Uhrzeigersinn definiert) aller Kippachsen K_i positiv sind:

$$M_i > 0, \quad \text{für } i = 1..n - 1 \quad (4.44)$$

Dann kann die *Normalized Dynamic Energy Stability Margin* (NDESM) nach Gleichung 4.36 verwendet werden um die Güte der Stabilität zu bewerten.

4.2.4. Geschwindigkeitsmetriken

Das mehrbeinige Laufen ist auf ebenen Untergrund, auf Schienen oder Straßen signifikant langsamer als fahrende rad- oder kettengetriebene Systeme. Aber dort wo die Straßen und Wege aufhören, das Gelände rau ist, zeigen Beine ihre Stärken. Auch in diesen extremen Situationen erreichen Tiere und Insekten noch beeindruckende Geschwindigkeiten. Vor allem wenn man sich die Körpergröße von Insekten ansieht, sind die Geschwindigkeiten beachtlich. Die Frage ist, wie vergleicht man die Laufgeschwindigkeiten von Tieren, Insekten oder auch Laufrobotern miteinander, wenn diese sich sowohl in ihrer Größe sowie Lokomotionsprinzipien so stark unterscheiden? In der Literatur finden sich einige Ansätze wie die Geschwindigkeiten miteinander verglichen werden können. Zunächst soll an dieser Stelle jedoch noch das Bewusstsein dafür geschärft werden, dass Laufbewegungen in der Regel keine konstanten, homogenen Geschwindigkeiten erzeugen. In der Arbeit von *Holmes et al.* wird das dynamische Laufverhalten unter anderem der Kakerlake (*Blaberus discoidalis*) im Detail untersucht [99]. In der Abbildung 4.15 ist links gut zu erkennen, dass die

Kakerlake durch den Lastwechsel zwischen den beiden Tripod-Beinpaaren im Yaw-Winkel beim Laufen oszilliert. Ebenso ist rechts in der gleichen Abbildung zu erkennen, dass diese Oszillationen sich auf viele Kenngrößen auswirken. So schwankt auch die Vorwärtsgeschwindigkeit zwischen 0,19m/s und 0,25m/s (siehe oben rechts in Abb. 4.15). Bei Laufrobotern, insbesondere solchen, die dynamisch laufen, sind die

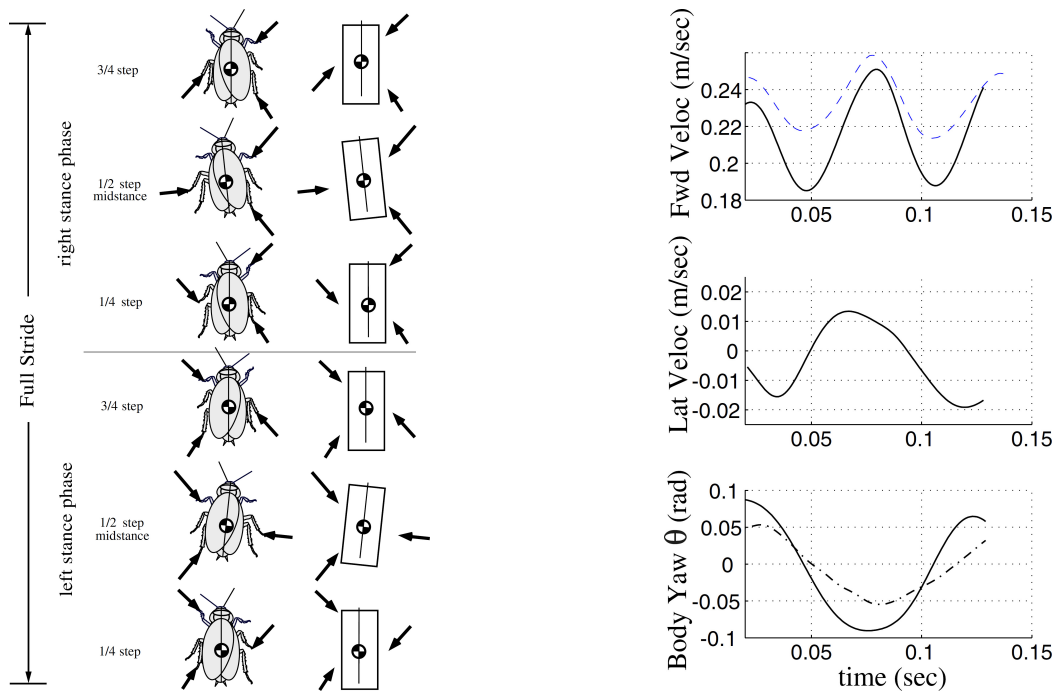


Bild 4.15.: Laufgeschwindigkeiten sind nicht konstant: (links) Darstellung der Yaw-Drehbewegungen der amerikanischen Kakerlake während des Laufens, (rechts) Auswirkungen auf die Geschwindigkeiten: (rechts oben) Zwei Datensätze mit oszillierenden Laufgeschwindigkeiten in Vorwärtsrichtung, (rechts mittig) Geschwindigkeiten orthogonal zur Laufrichtung mit Oszillation des Körpers, (rechts unten) Winkelveränderungen in Yaw Richtung aufgrund der Oszillationen beim Laufen. Quelle [99].

gleichen oszillierenden Bewegungen des Zentralkörpers zu beobachten. Aber auch statisch stabil laufende, langsamere Roboter wie *LAURON IVc* erreichen keine konstante Geschwindigkeit. In der Abbildung 4.16 ist der vorwiegend lineare Verlauf der Distanz in Laufrichtung klar zu erkennen. Jedoch sind auch stets kleinere Störungen und Schwankungen sichtbar. Wenn man den typischen Anwendungsfall von Laufrobotern betrachtet, das Laufen in schwierigem, unstrukturierten Gelände, dann ist zusätzlich davon auszugehen, dass es durch Hindernisse und kleinere Kollisionen zu starken Geschwindigkeitsschwankungen kommen wird. Im Folgenden sollen verschiedene Ansätze und Methoden vorgestellt werden, die verwendet werden können um die Geschwindigkeit von Laufbewegungen vergleichbar zu machen.

Metrische Geschwindigkeit Am häufigsten werden metrische Angaben zur Laufgeschwindigkeit angegeben. Wenn es sich dabei um biologische Untersuchungen handelt, werden stets Mittelwerte angegeben um statistisch relevante Aussagen treffen zu können. Viele Geschwindigkeiten von Laufrobotern werden auch mit Mittelwerten angegeben (wie z.B. in [187]). In wissenschaftlichen Arbeiten werden in der Regel SI-Einheiten verwendet und entsprechend ist die Angabe der *metrischen Geschwindigkeit* $V_{metrisch}$ in [m/s] am häufigsten anzutreffen.

$$V_{metric} := \text{m/s} \quad (4.45)$$

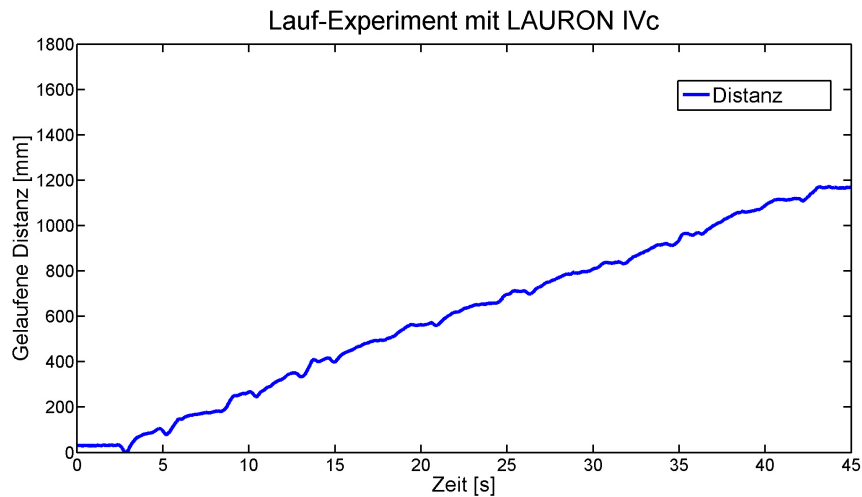


Bild 4.16.: Geschwindigkeitsmessung des Laufroboters *LAURON IVc*: Die Geschwindigkeit schwankt während der Laufbewegung und ist wie bei Tieren und Insekten durch Oszillationen nicht konstant. Quelle (modifiziert) [Hep11]

Natürlich werden auch andere Einheiten verwendet, diese lassen sich jedoch direkt in die Standard SI-Einheit umrechnen. Die Verwendung der *metrischen Geschwindigkeit* berücksichtigt keinerlei Größenunterschiede der Systeme.

Normiert auf maximale oder Referenz-Geschwindigkeit Häufig wird die Laufgeschwindigkeit in Bezug zu einer Referenzgeschwindigkeit normiert. Besonders wenn z.B. die die Belastung eines Laufroboters untersucht werden soll, wird als Referenzgeschwindigkeit die maximale Laufgeschwindigkeit verwendet. Oder es wird eine Referenzgeschwindigkeit eines anderen Systems angegeben um eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Systemen zu schaffen. Diese einfache Normierung berücksichtigt, wie die metrische Geschwindigkeit, keine Größenunterschiede, jedoch ist der Wert der Referenzgeschwindigkeit V_{ref} durch die Normierung einheitenlos.

$$V_{ref} = \frac{V_{metric}}{V_{metricReferenz}}. \quad (4.46)$$

Geschwindigkeit pro Körperlänge Eine weitere Möglichkeit die Geschwindigkeit zwischen verschiedenen Systemen vergleichbar zu machen, ist die Normierung anhand der geometrischen Größe der Systeme. Durchgesetzt hat sich vor allem die Normierung anhand der Körperlänge:

$$V_{bodylength} = \frac{V_{metric}}{L_{bodylength}}. \quad (4.47)$$

Die Normierung der Geschwindigkeit anhand der Körperlänge wird häufig in der Biologie verwendet [154][29]. Aber auch in der Robotik wird die *Geschwindigkeit pro Körperlänge* oft angegeben [31][10][197][103]. Die *Geschwindigkeit pro Körperlänge* $V_{bodylength}$ macht deutlich, welche beeindruckenden hohen Geschwindigkeiten Insekten, kleine Tiere aber auch viele kleinere Laufroboter erreichen. Die $V_{bodylength}$ ist nicht einheitenlos und berücksichtigt auch nicht alle Aspekte der Größenunterschiede.

Normalisierte Geschwindigkeit aus der Biologie In einigen wissenschaftlichen Untersuchungen zur Ähnlichkeit der mehrbeinigen Lokomotion zwischen verschiedenen Tierarten wird versucht die Laufge-

schwindigkeit unabhängig von der Größe und Art vergleichbar zu machen. Oft werden die Messdaten gegenüber einem Referenzdatensatz normiert. Oder die *Schrittweite* und *Schrittfrequenz* werden in Relation zu einer langsamen, Referenz-Laufgeschwindigkeit gesetzt. *Gatesy und Biewener* gehen einen entscheidenden Schritt weiter und normalisieren die Geschwindigkeit zu einer einheitenlosen Zahl, die interessante Vergleiche möglich macht [81]. Als normierenden Faktor wird die mittlere Hüfthöhe L_{hip} verwendet um die verschiedenen Kinematiken zu abstrahieren. Weiter wird mit der Fallbeschleunigung g normiert und so die einheitenlose, normalisierte Geschwindigkeit definiert:

$$V_{normal} = \frac{V_{metric}}{\sqrt{L_{hip} \cdot g}} \quad (4.48)$$

Interessanterweise ähnelt diese Normierung der Definition der *Froude Number*, die von *Alexander* verwendet wurde um das Laufverhalten verschiedener Arten miteinander vergleichen zu können [7][4]. Die *Froude Number* wurde im Abschnitt 2.5 bereits als Methode zur Modellierung von Skalierungseffekten in der Biologie diskutiert. Die *normalisierte Geschwindigkeit aus der Biologie* V_{normal} entspricht der Quadratwurzel der *Froude Number* (siehe Gleichung 2.5). Die Definition der V_{normal} bzw. der *Froude Number* basiert physikalisch auf der Normierung der kinetischen Energie $E_{kin} = 1/2 \cdot m \cdot V_{metric}^2$ mit der potentiellen Energie $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$. Die Masse m kann aus den Gleichungen gekürzt werden. Als Höhe wird die mittlere Hüfthöhe L_{hip} verwendet und als Geschwindigkeit die metrische Laufgeschwindigkeit V_{metric} . Der konstante Faktor $1/2$ kann bei der Definition vernachlässigt werden, da er auf alle Geschwindigkeit angewendet werden würde und somit die Unterscheidbarkeit nicht beeinflusst.

4.2.5. Energieeffizienzmetriken

Das mehrbeinige Laufen kann durch die zugrundeliegenden physikalischen Effekten niemals so effizient werden wie eine rollende Bewegung. Das periodische Beschleunigen und Bremsen der Beine sowie die Interaktion mit dem Untergrund sind energetisch aufwändig. Die Rollbewegung eines starren, reibungsarmen Rades auf einer glatten Oberfläche benötigt im Gegensatz dazu nur minimal Energie. Die Natur hat dieses Effizienzproblem durch beeindruckend effiziente Antriebe gelöst: die Muskeln. Unabhängig davon können durch verschiedene Maßnahmen beim Laufen signifikante Mengen an Energie eingespart werden. Mit optimierten Feder-Dämpfer-Systemen können z.B. in elastischen Beinen viel Energie von einem Schritt zum nächsten zwischengespeichert werden, sodass insgesamt eine höhere Effizienz erreicht werden kann. Technische, laufende Systeme nutzen oft die gleichen Antriebstechnologien (z.B. Elektromotoren) wie radgetriebene Systeme. Somit ist bei Laufrobotern die Aktuatorik nicht besonders effizient bzw. keinesfalls effizienter als bei radgetriebenen Systemen. Deshalb müssen die Kinematik, Mechatronik, Regelung und Lokomotion möglichst effizient konzipiert und umgesetzt werden. Mehrbeinige Laufroboter müssen in der Lage sein für mehrere Stunden energetisch autark mit den Onboard-Batterien zu operieren, nur dann werden sie in Zukunft realistische Chancen haben außerhalb von Forschungslaboren erfolgreich eingesetzt zu werden. In diesem Abschnitt werden einige Energieeffizienzmetriken aus der Literatur vorgestellt, die dazu verwendet werden können Laufroboter hinsichtlich ihrer Energieeffizienz zu analysieren und optimieren.

Specific Resistance Bereits 1950 stellten *Gabrielli und von Karman* fest, dass der Mensch einen starken Drang hat immer höhere Geschwindigkeiten zu erreichen [218]. Allerdings stellten sie ebenso fest, dass ab einer bestimmten Geschwindigkeit jede weitere Geschwindigkeitssteigerung unwirtschaftlich und ineffizi-

ent wird. Die Autoren haben mit der Normierung der Fortbewegungsenergie anhand des Gewichts und der Geschwindigkeit eine der wichtigsten Energiemetriken der jüngeren Vergangenheit definiert. Die *Specific Resistance* ε definiert eine Art Gesamt-Reib-Koeffizient für die Lokomotion eines Systems und beinhaltet Verluste in der Übersetzung, dem Antrieb, Luftwiderstand aber auch Reibung mit dem Untergrund. Entsprechend könnte die *Specific Resistance* auch als *Gesamtbewegungs-Widerstand* bezeichnet werden. Weiter ist der Wert mit der Gewichtskraft ($F_G = m_R \cdot g$) normiert und enthält die Masse des Systems m_R sowie die Fallbeschleunigung g . Die *Specific Resistance* ε kann wie folgt ermittelt werden:

$$\varepsilon = \frac{P_{current}}{m_R \cdot g \cdot V_{current}} \quad (4.49)$$

In der Original-Form aus der Arbeit von *Gabrielli und von Karman* basiert die *Specific Resistance* auf der aktuellen Leistung $P_{current}$, die vom Gesamtsystem während der Lokomotion benötigt wird. Außerdem wird die aktuelle Geschwindigkeit $V_{current}$ zur Normierung verwendet. Da beide Werte nicht einfach messtechnisch zu erfassen sind, kann auch die integrierte Gleichung verwendet werden.

$$\varepsilon = \frac{E_{distance}}{m_R \cdot g \cdot L_{distance}} \quad (4.50)$$

In dieser Gleichung wird die verbrauchte Energie $E_{distance}$ und die zurückgelegte Strecke $L_{distance}$ zur Berechnung der *Specific Resistance* verwendet. Diese Werte sind deutlich einfacher empirisch zu ermitteln. Bei genauerer Betrachtung der Gleichung 4.50 fällt auf, dass der Nenner stark in die Definition der mechanischen Arbeit $W = F \cdot s$ erinnert. Allerdings wird bei der mechanischen Arbeit davon ausgegangen, dass die Kraft F dazu verwendet wird einen Gegenstand entlang der Strecke s zu bewegen. Dies trifft bei der Definition *Specific Resistance* nicht zu, da die zurückgelegte Strecke $L_{distance}$ und die Gewichtskraft $F_G = m_R \cdot g$ orthogonal zueinander stehen. Ziel bei der Entwicklung der *Specific Resistance* war es eine Vergleichbarkeit zwischen sehr unterschiedlichen Fortbewegungsarten zu schaffen. In der Arbeit wurden menschliche Fußgänger mit Pferden, Radfahren, Hubschaubern und Kampfflugzeugen verglichen. In der Abbildung 4.17 sind die Werte der *Specific Resistance* logarithmisch aufgetragen. Dabei wird nicht nur eine oder die maximale Geschwindigkeit eines Systems betrachtet, sondern die *Specific Resistance* wird für einen Geschwindigkeitsbereich ermittelt. So kann auch für ein einzelnes System analysiert werden, bei welcher Geschwindigkeit die Effizienz am besten ist (Zahlenwert am kleinsten). Weiter stellen *Gabrielli und von Karman* fest, dass es natürliche Grenzen der Effizienz im Verhältnis zur Geschwindigkeit zu geben scheint. Die Gerade, die diese Grenze definiert wird auch *Gabrielli und von Karman-Linie* genannt. Die Arbeit befasst sich außerdem auch mit der Energieeffizienz von Tieren und Menschen.

Die *Specific Resistance* ε wird sehr häufig in der Robotik verwendet um die Leistungsmerkmale eines Laufroboters zu beschreiben [41][205][141][18]. Oder sie wird wie in [187] verwendet um die Lokomotionsparameter für verschiedene Untergründe zu optimieren. In der Abbildung 4.18 sind verschiedene Messreihen des Laufroboters RHex auf unterschiedlichen Untergründen dargestellt. Leider werden nicht immer die gleichen Annahmen bzgl. der Messgrößen getroffen, so dass der Zahlenwert der *Specific Resistance* oft nicht vergleichbar ist. Insgesamt ist die *Specific Resistance* dennoch eine der wichtigsten Metriken für Laufroboter, obwohl sie gar nicht für diese entwickelt wurde.

Analysen und Optimierungen anhand der Specific Resistance Die *Specific Resistance* kann nicht nur mit aktuellen Messdaten, sondern auch zur theoretischen Analyse und zur Optimierung der Lokomo-

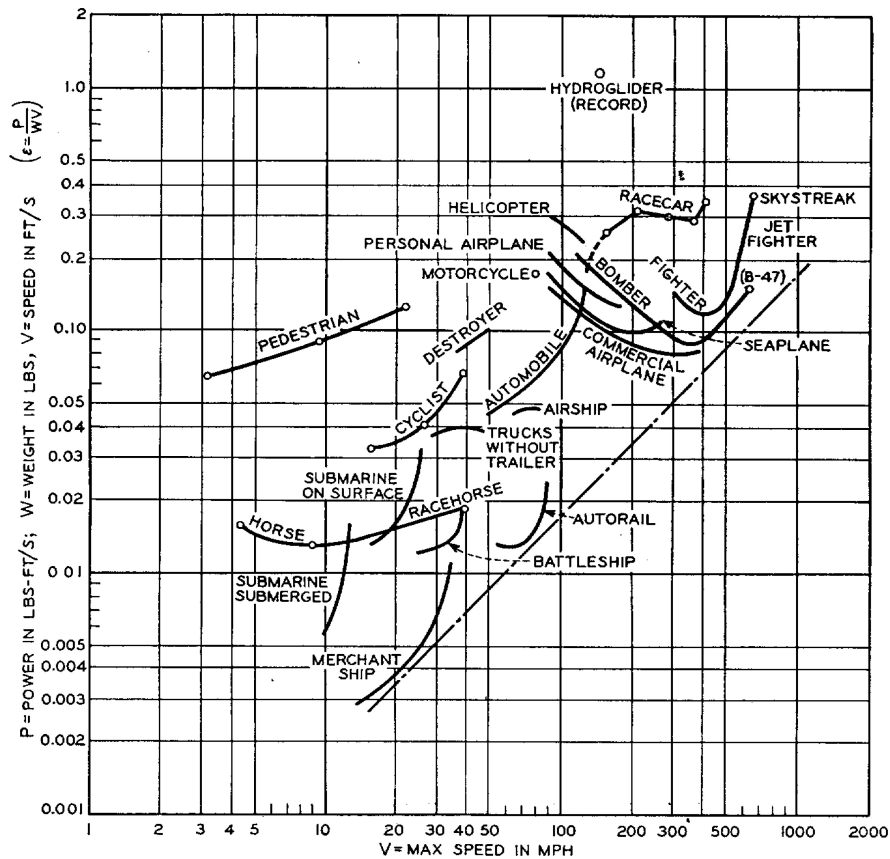


Bild 4.17.: Specific Resistance verschiedener Fortbewegungsarten: durch die Normierung wird ein Vergleich zwischen sehr unterschiedlichen Systemen möglich. Quelle [218]

tionsparameter eingesetzt werden. *Komatsu et al.* setzen die *Specific Resistance* in der leistungsbasierten Formulierung ein um die Lauffähigkeiten des Roboter *TITAN XII* am Hang zu verbessern [132]. Dabei analysieren sie, dass die Eingangsleistung P_{in} aus der mechanischen Leistung P_{mech} und der Wärmeverlustleistung P_{heat} zusammengesetzt ist:

$$\epsilon = \frac{P_{in}}{m \cdot g \cdot V} = \frac{P_{mech} + P_{heat}}{m \cdot g \cdot V} \quad (4.51)$$

Auch hier werden weiterhin die Masse m , die Fallbeschleunigung g und die Geschwindigkeit V zur Normierung verwendet. Mit einigen vereinfachenden Annahmen wie z.B. dass die Beine masselos sind und dass diese während der Schwingphase keine Energie verbrauchen, erhalten die Autoren die für ein System mit 3 Gelenken pro Bein sowie N Beinen die Leistung P_{mech} :

$$P_{mech} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^3 a_{ij} M_{ij} \omega_{ij} \quad (4.52)$$

mit

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & M_{ij} \omega_{ij} \geq 0 \\ 0 & M_{ij} \omega_{ij} < 0 \end{cases} \quad (4.53)$$

Negative Energierückflüsse werden nicht berücksichtigt. Diese spielen bei den meisten Laufrobotern insbesondere bei langsamen Systeme in der Regel eine untergeordnete Rolle. Für die thermischen Verluste ergibt

4. Modellbasierte Metriken für den Entwurf und die Optimierung

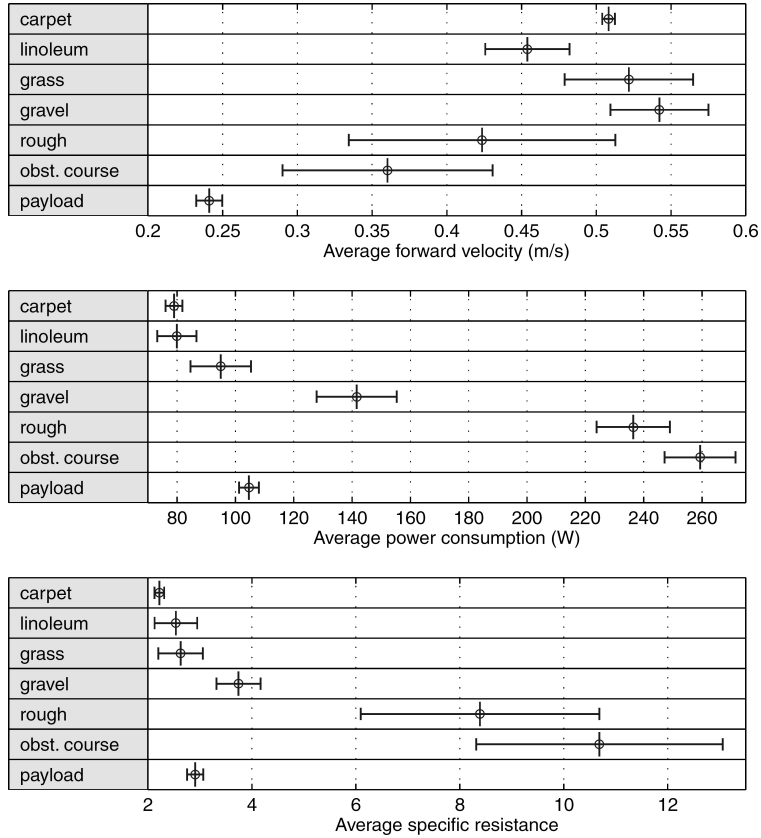


Bild 4.18.: Specific Resistance zur Optimierung der Lokomotionsparameter auf unterschiedlichen Untergründen. Quelle [187]

sich mit einem DC Motormodell die folgende, detailliert modellierte Verlustleistungsgleichung:

$$P_{heat} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^3 \left[\frac{R_a}{K^2} \frac{M_{ij}^2}{\xi^2} + \frac{2R_a}{R_h} M_{ij} \omega_{ij} + \frac{K^2}{R_h} \left(\frac{R_a}{R_h} + 1 \right) \xi^2 \omega_{ij}^2 \right] \quad (4.54)$$

Die Parameter R_a , K , R_h und ξ beschreiben Eigenschaften des Motors bzw. der Getriebe (siehe Details zur Herleitung der Verlustleistung in [132]). Mit einem nichtlinearen Optimierungsverfahren werden die Werte der *Specific Resistance* für die Anpassung der Laufbreite verwendet und so verbesserte Lokomotionsparameter zum Überwinden von Steigungen gefunden. Diese Anwendung der *Specific Resistance* zur Optimierung bestimmter Laufroboterfähigkeiten steht stellvertretend für viele weitere Arbeiten, die diese Metrik erfolgreich nutzen.

Cost of Transport (CoT) Die *Cost of Transport* wird in der Robotik häufig verwendet um die Laufleistung von Robotern zu beschreiben. Dabei handelt es sich um die identische Definition wie die bereits vorgestellte *Specific Resistance* [218] (siehe Anfang Abschnitt 4.2.5).

$$CoT = \frac{E_{distance}}{m \cdot g \cdot L_{distance}} \quad (4.55)$$

Die *Cost of Transport* verwendet die integrierte Form der *Specific Resistance* mit der verbrauchten Energie $E_{distance}$ und der zurückgelegten Strecke $L_{distance}$. Die Normierung erfolgt weiter mit der Masse m und der Fallbeschleunigung g . Die *Cost of Transport* wird zum Beispiel in den folgenden Arbeiten mit genau der

Definition nach *Gabrielli und von Karman* verwendet [201][228][41]. Der Begriff *Cost of Transport* ist etwas irreführend, da er dazu verleitet anzunehmen, es geht um die Kosten für den Transport einer Last. Die *Cost of Transport* betrachtet jedoch die verbrauchte Energie des Systems für die Fortbewegung und könnte besser als *Fortbewegungskosten* beschrieben werden. Leider ist auch diese Definition wie die ursprüngliche *Specific Resistance* nicht eindeutig. *Seok et al.* definieren deswegen zwei Varianten, die sogenannte *Total Cost of Transport (TCoT)* und die *Mechanical Cost of Transport (MCoT)* [201], bei der jeweils eindeutig definiert ist, welche $E_{distance}$ verwendet werden soll. Für die *Total Cost of Transport* oder auch *Energetic Cost of Transport* nach *Kuo* [135] wird die verbrauchte Gesamtenergie des Roboters verwendet. Die *TCoT* beinhaltet über die Gesamtenergie $E_{Total_{distance}}$ somit die Verluste durch die Interaktion mit dem Untergrund, die Reibungsverluste in den Übersetzungen, die Wärmeverluste in den Aktuatoren sowie die Verluste für Onboard-Steuer- und Leistungselektronik.

$$TCoT = \frac{E_{Total_{distance}}}{m \cdot g \cdot L_{distance}} \quad (4.56)$$

Im Gegensatz dazu wird bei der *Mechanical Cost of Transport (MCoT)* nur die reine mechanische Ausgangsleistung $E_{Mech_{distance}} = \sum M_i \omega_i$ aus den Gelenkmomenten M_i und Gelenkwinkelgeschwindigkeiten ω_i betrachtet. Die *MCoT* konzentriert sich viel stärker auf die Lokomotion als auf das gesamte Robotersystem.

$$MCoT = \frac{E_{Mech_{distance}}}{m \cdot g \cdot L_{distance}} \quad (4.57)$$

Bei beiden Gleichungen der *TCoT* und *MCoT* wird zur Normierung die frei wählbare Distanz $L_{distance}$ sowie die Gewichtskraft des Systems $F_G = m \cdot g$ mit der Masse m und der Fallbeschleunigung g verwendet. In der Arbeit von *Hutter et al.* wird gezeigt wie der vierbeinige Laufroboter *StarLETH* durch *SEA*-Antriebe² eine sehr gute Energieeffizienz erreicht [103]. In den Antrieben kann über die mechanische Elastizitäten Energie zwischen gespeichert werden. Zusammen mit der gut durchdachten Kinematik sowie der schnellen Regelung schafft *StarLETH* eine sehr gute *TCoT* von 1,7 [103]. Im Vergleich zu anderen Laufrobotern, aber auch Tieren ist dies ein beachtlich guter Wert (siehe auch Abbildung 4.19). Noch effizienter ist der *MIT Cheetah*, der mit dem Ziel die Energieeffizienz zu optimieren nach vier Designregeln entwickelt wurde [201]: starke Torque-Motoren, Elektronik mit Rekuperationmöglichkeiten, effiziente mechanische Übersetzungen und minimales Gewicht der Beine. So erreicht der *MIT Cheetah 2* [164] sogar den beeindruckenden Wert von $TCoT=0,47$ und ist damit effizienter als ein Hund (siehe Abb. 4.19). Die niedrigsten *CoT* Werte erreichen sogenannte *Passiv Dynamic Walker* (*Ranger* erreichte ein *TCoT* von 0,19 [28].) Weitere Details zu den *Passiv Dynamic Walker* findet sich im Kapitel 3.

Cost of Climbing (CoC) Die Reibungskräfte der Füße mit dem Untergrund spielen insbesondere bei schnelleren Laufrobotern eine Rolle. Im Gegensatz zu vielen anderen Arbeiten vernachlässigen *Zarrouk und Fearing* diese Kräfte nicht, sondern modellieren sie sehr ausführlich [236]. Basis für ihre Untersuchungen bildet die *Cost of Transport* angelehnt an die *Specific Resistance* [218]. Jedes Bein des sechsbeinigen Roboters wird mit zwei Federn, einer linearen Feder entlang der Beinlänge und einer Torsionsfeder im Hüftgelenk, modelliert. Die Beine werden als masselos, aber durch die Federn elastisch angenommen. *Zarrouk und Fearing* untersuchen ausführlich den Einfluss der Schwerkraft, Verluste durch Schlupf und energeti-

²SEA: Serial Elastic Aktuator

4. Modellbasierte Metriken für den Entwurf und die Optimierung

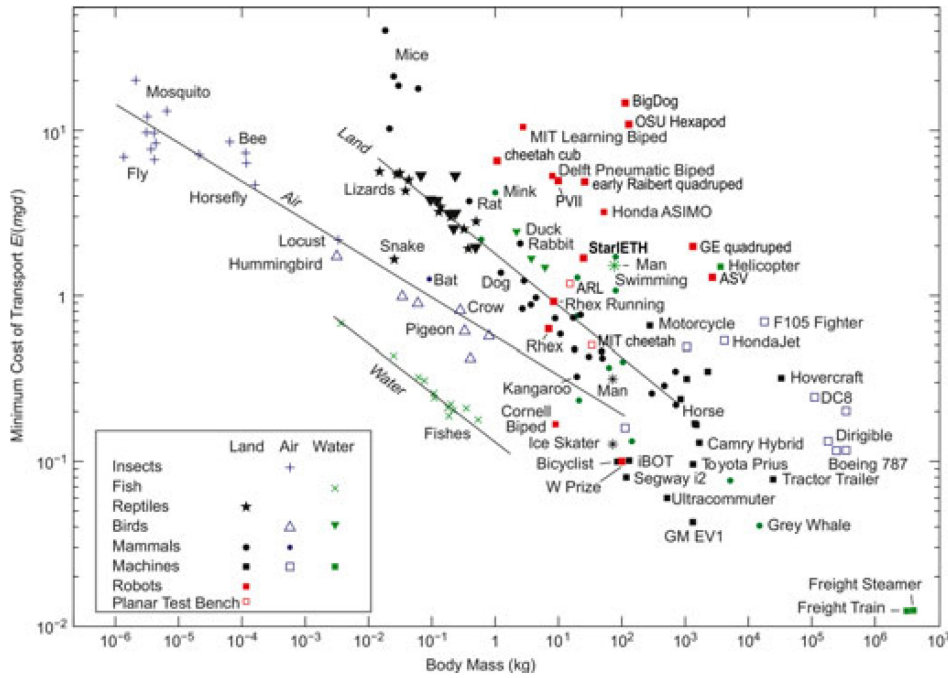


Bild 4.19.: Cost of Transport für Tiere, Insekten, Maschinen und Laufroboter. Quelle [103]

sche Oszillationen. Die *Cost of Transport* ergibt sich mit der Energie für die Lokomotion W_{input} und der zurückgelegten Distanz $L_{distance}$ wie sonst auch mit der Masse m und Fallbeschleunigung g zu:

$$CoT = \frac{W_{input}}{m \cdot g \cdot L_{distance}} \quad (4.58)$$

Die Energie für die Lokomotion setzen *Zarrouk und Fearing* aus der benötigten Energie zum Überwinden der Schwerkraft $W_{Schwerkraft}$, den Energieverlusten durch Schlupf $W_{Schlupf}$ sowie den Oszillationen der kinetischen Energie ΔE_k zusammen:

$$W_{input} = W_{Schwerkraft} + W_{Schlupf} + \Delta E_k \quad (4.59)$$

Die Energie zum Überwinden der Schwerkraft $W_{Schwerkraft}$ kann mit dem Winkel der Steigung λ sowie der dazugehörigen Höhendifferenz Δh nach dem Prinzip der potentiellen Energie abgeschätzt werden:

$$W_{Schwerkraft} = m \cdot g \cdot \Delta h = m \cdot g \cdot \sin(\lambda) \cdot L_{distance} \quad \text{mit } \Delta h = \sin(\lambda) \cdot L_{distance} \quad (4.60)$$

Die Energieverluste durch den Schlupf $W_{Schlupf}$ werden mit dem Coulombschen Reibungskoeffizienten μ_k , der Beingeschwindigkeit V_{leg} sowie den Bodenkontaktkräften F_n modelliert.

$$W_{Schlupf} = \mu_k \sum_i \int_t F_n^{(i)} V_{leg}^{(i)} dt \quad (4.61)$$

Als letzte Komponente in der Gleichung 4.59 wird noch die Oszillation der kinetischen Energie ΔE_k betrachtet. Diese ist im eingeschwungenen Zustand und konstanter Geschwindigkeit vernachlässigbar klein. Während der Anfangsbeschleunigung und beim Abbremsen spielt die kinetischen Energie ΔE_k jedoch eine

wichtige Rolle:

$$\Delta E_k = \int_x (F_{thrust} - F_G) dx \quad (4.62)$$

Die Schwerkraft F_G wird von der Schubkraft F_{thrust} subtrahiert und mit der Strecke x multipliziert. Die Herleitung der Schubkraft F_{thrust} kann [236] entnommen werden. Wie die *Cost of Transport* ergibt sich für die zurückgelegte Höhendifferenz Δh die *Cost of Climbing (CoC)* zu:

$$CoC = \frac{W_{input}}{m \cdot g \cdot \Delta h} = \frac{W_{input}}{m \cdot g \cdot L_{distance} \cdot \sin(\lambda)} \quad (4.63)$$

Die Analysen der Energieverteilung durch die detaillierte Simulation mit realistischen Kennwerten nach dem Vorbild des *DASH* Roboters ergibt, dass ca. 85% der Verluste für den Schlupf und die Arbeit zum Überwinden der Schwerkraft gebraucht werden.

Detaillierte Schätzung der Cost of Transport nach Nishii Untersuchungen mit laufenden Pferden haben gezeigt, dass diese ihr Laufmuster je nach Geschwindigkeit anpassen [100]. *Nishii* schließt daraus, dass die Natur stets einer Strategie folgt um die zahlreichen Parameter des Laufen zu optimieren [156] [155]. Zentrale wichtige Parameter, die mit der Geschwindigkeit angepasst werden sind die Schrittweite, Schrittfrequenz sowie das Laufmuster. Die *Metabolic Cost of Transport (MetaCoT)*, die auf der experimentellen Messung des Sauerstoffverbrauchs bei laufenden Tieren beruht, steigt mit der Geschwindigkeit. Wird die *MetaCoT* mit der Masse und der zurückgelegten Strecke normiert, ist dieser Wert überraschenderweise in weiten Bereichen konstant. *Nishii* leitet eine komplexe Gleichung zur Schätzung der *Cost of Transport* her um zu beweisen, dass die Natur die Lokomotion stets energetisch optimiert. Die Gleichung beinhaltet neben der mechanischen Arbeit, im Gegensatz zu vielen anderen Arbeiten, auch die Wärmeverluste in den Antrieben. Der Name *Cost of Transport* ist an dieser Stelle widersprüchlich, da er auch für das Kriterium nach *Gabrielli und von Karman* [218] häufig verwendet wird (siehe Anfang Abschnitt 4.2.5). Aus diesem Grund wird im Weiteren hier die *Cost of Transport nach Nishii* verwendet. *Nishii* leitet jeweils eine Gleichung für die Arbeit in der Schwing-Phase $T_{schwing}$ und in der Stemm-Phase T_{stemm} her (siehe auch Abschnitt 2.4). Die Arbeit für eine Zykluszeit T mit Schwing- und Stemmphase lässt sich mit dem Drehmoment M und der Winkelgeschwindigkeit $\dot{\theta}$ wie folgt abschätzen:

$$W = \int_T (M(t) \cdot \dot{\theta}(t)) dt \quad (4.64)$$

Dabei vereinfacht *Nishii* das Bein des Laufroboters zu einem einfachen Modell mit nur einem Freiheitsgrad (siehe Abbildung 4.20). Der Winkel θ beschreibt die Stellung dieses vereinfachten Beinmodells und $\dot{\theta}$ entsprechend die Winkelgeschwindigkeit des Beins. Die Gleichung überrascht nicht, da die mechanische Leistung über $P_{mech} = M \cdot \dot{\theta}$ ermittelt werden kann. Die Arbeit entspricht dem Integral dieser Leistung über die Zeit, wie in Gleichung 4.64 modelliert. Weiter wird angenommen, dass der Einfluss der Schwerkraft auf das Bein vernachlässigt werden kann. Außerdem wird keine negative Arbeit, die evtl. durch elastische/federnde Element im Bein in das System zurückfließen könnte, berücksichtigt. Das Drehmoment $M_{schwing}$ während der Schwingphase lässt sich mit der Beinlänge l , dem Trägheitsmoment des Beines I sowie relativen Fußgeschwindigkeit zum Körper $\dot{x} = -V$ folgendermaßen abschätzen:

$$M_{schwing}(t) = I\ddot{\theta}(t) \simeq I\ddot{x}(t)/l \quad (4.65)$$

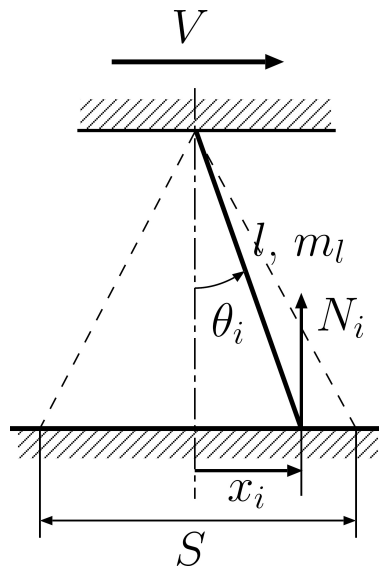


Bild 4.20.: Einfaches Beinmodell zur Berechnung der Arbeit im Bein während der Schwing-Phase. Annahme das System bewegt sich mit einer konstanten Geschwindigkeit V vorwärts. Damit lässt sich abschätzen $V = S/l\beta T$ mit der Schrittweite S , der Beinlänge l , Dutyfactor β und der Zykluszeit T . Weiter sind die Bodenkontaktkraft $N_i(t)$ sowie die Masse eines Beines m_l sowie die karthesische Koordinate x_i dargestellt. Quelle [156]

Mit einigen Zwischenschritten, deren Herleitung [156] entnommen werden kann, sowie dem Dutyfactor β und der Laufgeschwindigkeit V ergibt sich für die Arbeit während der Schwing-Phase die folgende Approximation:

$$W_{schwing} = \int_{T_{schwing}} (M_{schwing} \cdot \dot{\theta}) dt \simeq I \left(\frac{V}{l} \right)^2 \frac{1 + \beta^2}{(1 - \beta)^2}. \quad (4.66)$$

Im nächsten Herleitungsschritt der *Cost of Transport nach Nishii* muss die Arbeit während der Stemmphase ermittelt werden. Die Winkelgeschwindigkeit $\dot{\theta}$ kann mit der konstanten Laufgeschwindigkeit V und der Beinlänge l abgeschätzt werden.

$$\dot{\theta} \simeq -V/l \quad (4.67)$$

Das Drehmoment während der Stemmphase wird durch die Bodenkontaktkräfte $N(t)$ und dem Hebelarm $x(t)$ angenähert.

$$M_{stemm}(t) = -N(t) \cdot x(t) \quad (4.68)$$

Dabei ist $N(t)$ nur die horizontale Komponente der Bodenkontaktkraft (siehe Abbildung 4.20). So ergibt sich für die Arbeit W_{stance} während der Stemmphase insgesamt:

$$W_{stance} = \int_{T_{stemm}} (M_{stemm}(t) \cdot \dot{\theta}) dt = \int_{T_{stemm}} (N(t) \cdot x(t) \frac{V}{l}) dt \quad (4.69)$$

Nachdem die Arbeit der Laufbewegung erfolgreich abgeschätzt wurde, müssen jetzt die Energieverluste durch die Wärmeentwicklung ermittelt werden. Die Verluste während der Schwingphase $H_{schwing}$ hängen unmittelbar vom Drehmoment $M_{schwing}$ ab:

$$H_{schwing} = \gamma \int_{T_{schwing}} |M_{schwing}(t)|^2 dt \quad (4.70)$$

Hierbei gibt γ einen konstanten Faktor an, der das Verhältnis der Wärmeverluste zum Drehmoment beschreibt. Die Abschätzung für die Verluste während der Stemmphase H_{stemm} ist etwas komplizierter, da

nicht nur das Drehmoment der Vorwärtsbewegung, sondern auch das Drehmoment entgegen der Gravitation betrachtet werden muss:

$$H_{stemm} = \gamma \int_{T_{stemm}} (|M_{stemm}(t)|^2 + |\alpha N(t)|^2) dt \quad (4.71)$$

N beschreibt die Bodenkontaktkraft und α einen Faktor, der ebenfalls das Verhältnis der Wärmeverluste zu der Bodenkontaktkraft skaliert. Die Abschätzungen für die mechanische Arbeit sowie die Wärmeverluste müssen für alle n Beine betrachtet werden und mit der Gewichtskraft F_G und der Geschwindigkeit V und der Zykluszeit T normiert werden. Dann ergibt sich die *Cost of Transport* nach *Nishii* zu:

$$e^{nishii} = \frac{\sum_{i=1}^n ((W_{i_{schwing}} + W_{i_{stemm}}) + (H_{i_{schwing}} + H_{i_{stemm}}))}{F_G \cdot V \cdot T} \quad (4.72)$$

Die einzelnen Verlustterme werden in [156] noch zu kompakteren Gleichungen weiterentwickelt. In dieser kompakten Form werden nur noch die folgenden Lokomotionsparameter des Roboters benötigt: $V :=$ konstante Laufgeschwindigkeit des Roboters, $\beta :=$ *Dutyfactor*, der das Laufmuster definiert, $S :=$ *Schrittweite*. Außerdem werden noch einige invariante Kenngrößen des Roboters benötigt: $n :=$ Anzahl der Beine, $I :=$ Trägheit eines Beines, $l :=$ Beinlänge, $F_G :=$ Gewichtskraft als Produkt aus der Masse des Roboters m_r und der Fallbeschleunigung g , $\gamma :=$ Skalierungsfaktor Drehmoment zu Wärmeentwicklung, $\alpha :=$ Skalierungsfaktor Bodenreaktionskräfte zu Wärmeentwicklung. Damit ergeben sich folgende vier kompakte Gleichungen für die *Cost of Transport nach Nishii*:

$$e_{W_{schwing}}^{nishii} = \frac{nI}{l^2 F_G} \frac{\beta V^2}{S} \frac{1 + \beta^2}{(1 - \beta)^2} \quad (4.73)$$

$$e_{W_{stemm}}^{nishii} = \frac{1}{8l} S \quad (4.74)$$

$$e_{H_{schwing}}^{nishii} = \gamma \frac{2n\pi^2 I^2}{l^2 F_G} \frac{V^3 \beta^2}{(1 - \beta)^3 S^2} \quad (4.75)$$

$$e_{H_{stemm}}^{nishii} = \gamma \frac{F_G}{n} \frac{1}{\beta V} \left(\alpha^2 + \frac{S^2}{12} \right) \quad (4.76)$$

Aus den Gleichungen für den Energieverbrauch während der Schwing-, Stemmphase ($e_{W_{schwing}}^{nishii}$ und $e_{W_{stemm}}^{nishii}$) sowie den Verlustenergien während der Schwing-, Stemmphase ($e_{H_{schwing}}^{nishii}$ und $e_{H_{stemm}}^{nishii}$) lassen sich spannende Erkenntnisse ableiten. Bei einem großen *Dutyfactor* β sind die Wärmeverluste in der Stemmphase niedrig, da mit einem großen *Dutyfactor* viele Beine die Gewichtskraft während der Stemmphase tragen. In der Schwingphase verringert eine große *Schrittweite* den Energieverbrauch $e_{W_{schwing}}^{nishii}$, aber gleichzeitig werden die Verluste in der Stemmphase größer und so erhöht sich $e_{W_{stemm}}^{nishii}$. Die Gleichungen können verwendet werden um eine optimale, individuelle Kombination der Laufgeschwindigkeit, *Schrittweite* und Laufmuster für einen spezifizierten Laufroboter zu finden. In der Abbildung 4.21 sind Kurvenverläufe mit verschiedenen Geschwindigkeiten und Laufmustern dargestellt. Das Kriterium nach *Nishii* eignet sich sehr gut um kinematische Modelle miteinander zu vergleichen und theoretische Analysen durchzuführen. Aufgrund der komplizierten Herleitung wird das Kriterium, obwohl die Gleichungen in kompakter Form einfach sind und keine hohe Anforderungen an die Messdaten gestellt werden, deutlich seltener verwendet als die *Specific Resistance*. Dabei können auch nur Teile der Gleichungen verwendet werden [134]. *Kottege et al.* leiten z.B. andere Terme für die Wärmeverluste her, die sich aus den elektrischen Eigenschaften der verwendeten Elektromotoren ergeben. Der Ansatz von *Nishii* selbst verwendet keinerlei Annahmen über die Aktuatorik

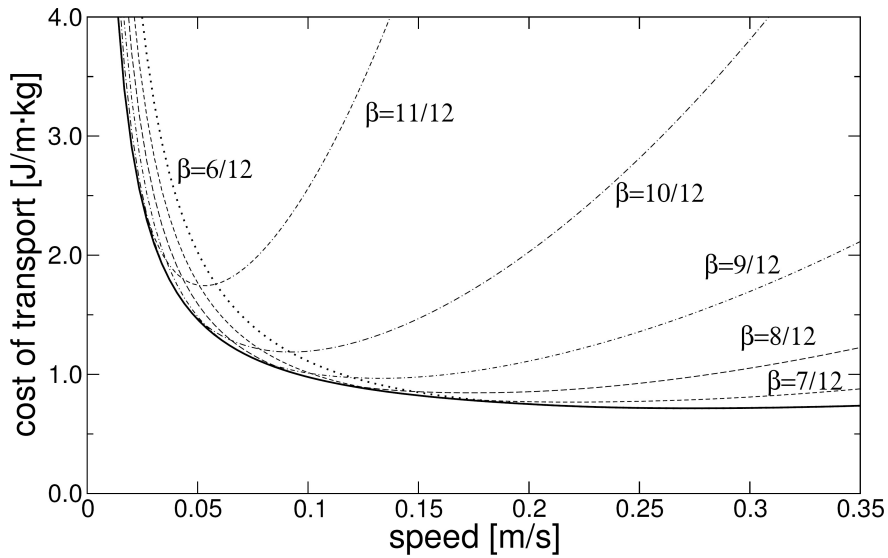


Bild 4.21.: Analyse der optimalen Laufparameter mittels *Cost of Transport nach Nishii*. Quelle [156]

und ist allgemeingültiger, aber auch entsprechend komplexer in der Anwendung.

Optimierung des Energieverbrauchs nach de Santos Der Fokus dieser Arbeit liegt darauf den Energieverbrauch für statisch stabil laufende Roboter zu minimieren [61]. Zunächst wird der Energieverbrauch anhand eines DC-Elektromotor-Modells mit der Motorspannung $u(t)$ sowie dem verbrauchten Motorstrom $i(t)$ für ein Gelenk i hergeleitet:

$$E_i^{santos}(t) = \int (u(t)i(t))dt = \int (\omega(t)M(t))dt + \int \left(\frac{R}{k_m^2}M^2(t)\right)dt \quad (4.77)$$

Diese Grundgleichung wird weiter zerlegt in die mechanische Arbeit aus dem Produkt der Winkelgeschwindigkeit ω und dem Drehmoment M sowie der elektrischen Verlustleistung. Die Verlustleistung hängt wiederum vom Drehmoment M , dem ohmschen Widerstand der Motorwicklung R und dem Drehmomentfaktor k_m ab. Da die einfachen Elektromotoren bzw. die dazugehörige Steuerelektronik des *SILO6* Roboters keine Energierückflüsse unterstützen, werden diese im Weiteren nicht betrachtet. *De Santos et al.* konzentrieren sich auf einen konkreten Anwendungsfall: ein sechsbeiniger Laufroboter läuft entlang einer geraden Linie vorwärts [61]. Die Körperhöhe bleibt konstant, die Laufgeschwindigkeit sowie die *Schrittweite* sind ebenfalls konstant. Da alle Lokomotionsparameter wie die *Schrittweite*, das Laufmuster sowie die Geschwindigkeit bzw. *Zykluszeit* konstant sind, hängt die Energieeffizienz nur noch von den Beintrajektorien ab. Die folgende Gleichung erfasst die Energie der mechanischen Arbeit sowie die Wärmeverluste für einen Roboter mit 6 Beinen und 3 Gelenken pro Bein:

$$E^{santos}(t) = \int_0^T \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^3 (\omega_{ij}(t)M_{ij}(t))dt + \int \left(\frac{R_j}{k_j m^2}M_{ij}^2(t)\right)dt \quad (4.78)$$

Die Berechnung der Gleichung ist aufwändig, so dass *de Santos et al.* diese nicht online auf dem Roboter ausführen konnten. Die Gleichungen können dennoch gut dazu verwendet werden um energetisch günstige Fußpunkte auf flachen, aber auch schwierigem Gelände zu finden. Der Energieverbrauch hängt vor allem von den Motordrehmomenten und den Winkelgeschwindigkeiten ab, die beide wiederum von den Fußpunk-

ten abhängen. Interessanterweise sind die Wärmeverluste mit 68,2% der Gesamtenergie größer als die Energie, die für die eigentliche Laufbewegung verbraucht wird. Dies zeigt das große Potential, das auch noch in der Weiterentwicklung von effizienteren Aktuatoren liegt. Insgesamt konnte die Optimierung der Fußpunkte die Energieeffizienz nur geringfügig verbessern (ca. 3,0%), zeigt jedoch auch, dass eine Optimierung des Energieverbrauchs alleine durch die Wahl der Fußpunkte möglich ist.

Energieverbrauch nach de Cavagna In einer frühen Arbeit von *Cavagna und Kaneko* wird die Beziehung zwischen der mechanischen Arbeit und der Lokomotionsgeschwindigkeit analysiert [47]. Die Arbeit basiert im Wesentlichen auf einer Studie mit vier menschlichen Probanden. Die Erkenntnisse sind jedoch allgemeingültig und lassen sich auf mehrbeinige Roboter übertragen. Die Probanden mussten bei verschiedenen Geschwindigkeiten auf einer Indoor-Strecke gehen und rennen. Videodaten wurden mit der Hilfe von Markern an verschiedenen Teilen des Körpers ausgewertet um die kinetische Energie der Extremitäten in Relation zur Bewegung des Körpers zu ermitteln. Die gesamte kinetische Energie E_{total} wird nach dem ‚Satz von König‘³ bestimmt: Summe des bewegten Massenschwerpunktes mit konstanter Geschwindigkeit $E_{extern} = \frac{1}{2}m_{total}V^2$ und kinetischen Energie aller sich relativ zum Massenschwerpunkt m_{total} bewegenden Extremitäten $E_{intern} = \frac{1}{2}\sum m_i V_i^2$ mit den Einzelmassen der Extremitäten m_i sowie den einzelnen Geschwindigkeiten V_i :

$$E_{total} = |E_{extern}| + |E_{intern}| = \left| \frac{1}{2}m_{total}V^2 \right| + \left| \frac{1}{2}\sum m_i V_i^2 \right| \quad (4.79)$$

Die Autoren schlagen vor diesen einfachen mechanischen Ansatz um die Betrachtung der potentiellen Energie zu erweitern und so die Qualität der geschätzten Gesamtenergie zu verbessern. Jedoch konzentriert sich die Arbeit auf die Unterschiede zwischen dem Gehen und Rennen, so dass eine einfache Annäherung durch die kinetische Energie ausreicht. Bei genauerer Betrachtung müsste bei den Experimenten eigentlich die Ruheenergie der Probanden im Stand von dem Gesamtenergieverbrauch abgezogen werden. Insbesondere bei langsamen Laufbewegungen ist der Einfluss der Ruheenergie größer als bei schnellen Laufbewegungen. Verschiedene Experimente belegen jedoch, dass der Effekt relativ klein ist und deshalb bei den weiteren Untersuchungen vernachlässigt wurde. *Cavagna und Kaneko* können mit ihren Experimenten belegen, dass die Energieeffizienz beim Menschen von der Laufgeschwindigkeit abhängt. Aufgrund der sehr unterschiedlichen dynamischen Effekte müssen das Gehen und Rennen unabhängig voneinander betrachtet werden. Beim Rennen wird die Effizienz mit zunehmender Geschwindigkeit aufgrund der Elastizitäten in den Beinen besser. Beim Gehen hängt die Effizienz nicht linear von der Geschwindigkeit ab, sondern erreicht sein Maximum bei mittleren Gehgeschwindigkeiten. Insgesamt konnten sehr große Unterschiede der Effizienz zwischen den Probanden festgestellt werden. Dies ist ein indirekter Beleg dafür, dass es möglich ist die Effizienz durch eine trainierte, optimierte Lokomotion signifikant zu verbessern.

Metabolic Cost of Transport (MetaCoT) In der Biologie wird häufig das Laufverhalten, aber auch der Effizienz von Tieren, Insekten und Spinnen aller Arten detailliert untersucht. Eine Metrik, die dort häufig eingesetzt wird, ist die *Metabolic Cost of Transport*. Nach *Alexander* ist diese wie folgt definiert [8]:

$$MetabolicCoT = \frac{MetabolicRate}{m \cdot V} \quad (4.80)$$

³Johann Samuel König, deutscher Mathematiker, 1712 – 1757

4. Modellbasierte Metriken für den Entwurf und die Optimierung

Dabei werden die *Metabolic Rate*, dem Energieverbrauch pro Sekunde, das Gewicht m und die Geschwindigkeit V verwendet. Da die Leistung bzw. der Energieverbrauch pro Sekunden bei Lebewesen nicht direkt gemessen werden kann, gibt es verschiedene indirekte Messmethode. Über den verbrauchten Sauerstoff kann auf die *Metabolic Rate* geschlossen werden, da bekannt ist wie viel Sauerstoff von den Muskeln benötigt wird um ein Joule Energie zu erzeugen. Die Messung des Sauerstoffverbrauchs ist sehr aufwändig (siehe Abb.4.22). Alternativ kann über den Herzschlag, Motion Capture Daten oder Bodenkontaktkräfte auf den Energieverbrauch geschlossen werden [34][8]. In der Arbeit von *Hoyt und Tayler* wurde der Sauerstoffver-

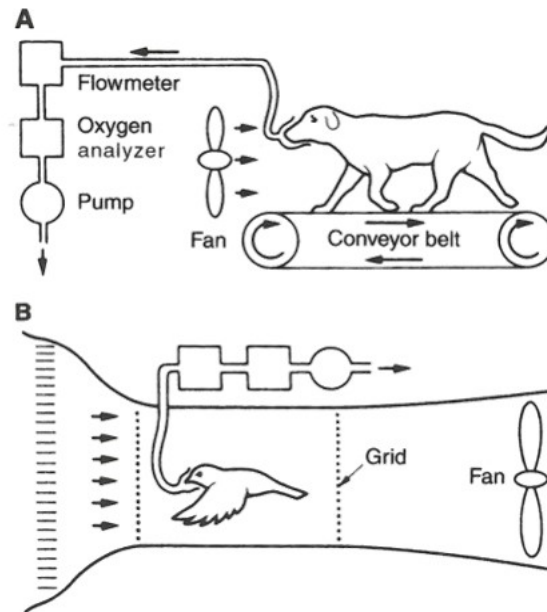


Bild 4.22.: Aufwändige Messmethoden sind notwendig um bei Lebewesen die *Metabolic Rate* zu bestimmen, die wiederum zur Berechnung der *Metabolic Cost of Transport* benötigt wird. Quelle [8]

brauch und damit die *Metabolic Rate* von Pferden bei verschiedenen Laufmustern und Geschwindigkeiten untersucht [100]. Dafür wurden Pferde speziell trainiert um auf einem Laufband mit den Laufmustern *Walk*, *Trott* und *Galopp* mit verschiedenen Geschwindigkeiten laufen zu können. *Hoyt und Tayler* konnten zeigen, dass die Effizienz bei jedem Laufmuster von der Geschwindigkeit abhängt (siehe Abbildung 4.23). In dieser in Abbildung 4.23 ist der normierte Sauerstoffverbrauch pro Meter, ähnlich der *Metabolic Cost of Transport*, dargestellt. Weiter ist zu erkennen, dass es jeweils eine optimale Laufgeschwindigkeit pro Laufmuster gibt. Der ansonsten natürliche, geschwindigkeitsabhängige Laufmusterwechsel, der hier durch das Training unterdrückt wurde, verbessert somit die Effizienz beim Laufen. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass untrainierte Pferde vor allem zwischen diesen diskreten, optimalen Geschwindigkeiten wechseln.

4.2.6. Diskussion Metriken aus der Literatur

Obwohl es für die Bereiche Stabilität, Geschwindigkeit und Energieeffizienz zahlreiche Metriken gibt um diese zu quantifizieren, sind viele davon eher ungeeignet um mehrbeinige Laufroboter miteinander zu vergleichen. Im folgenden Abschnitt werden die vorgestellten Ansätze analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet.

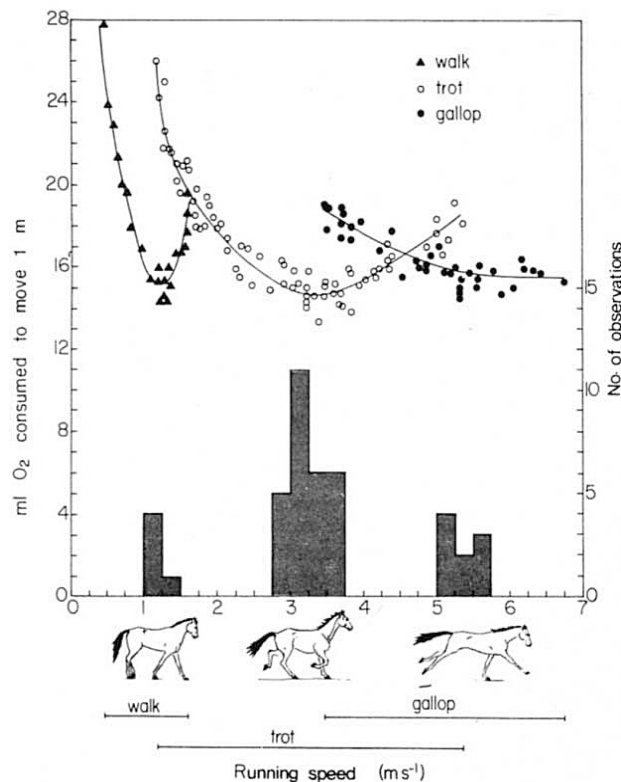


Bild 4.23.: Untersuchungen bei Pferden zeigen, dass die Natur stets die Energieeffizienz durch Veränderungen der Lokomotionsparameter optimiert. Quelle [100]

Diskussion der vorgestellten Stabilitätsmetriken Die zuvor vorgestellten Kriterien unterscheiden sich stark in ihrer Komplexität, Anwendbarkeit in verschiedenen Umgebungen und auch in ihrer Bekanntheit. In dieser Diskussion sollen vor allem die Methoden und Kriterien ermittelt werden, die am besten dafür geeignet sind verschiedene Robotersysteme hinsichtlich ihrer Stabilität miteinander zu vergleichen.

Die *Static Stability Margin* ist ein einfaches, klares Stabilitätskriterium, das insbesondere für langsam laufende Roboter auf vorwiegend ebenem Untergrund gute Ergebnisse liefert. Die Anforderungen an die Messtechnik und benötigten Daten sind einfach und können von nahezu jedem Roboter erfüllt werden. Der Stabilitätsabstand wird geometrisch angegeben, was für den Entwickler und Anwender eine einfach zu interpretierende Größe ist. Allerdings ist das Kriterium am Hang oder in rauem Gelände ungeeignet, da stets angenommen wird, dass sich alle Füße in einer Ebene befinden. Weiter fließt die Höhe des Schwerpunktes nicht in die Stabilitätsberechnung ein, es ist keine direkte Normierung gegenüber der Größe oder Kinematik vorgesehen und es werden keine dynamischen Effekte berücksichtigt. Somit wird die *Static Stability Margin* im Rahmen dieser Arbeit nicht näher als systemunabhängige Metrik in Betracht gezogen.

Bei der *Energie Stability Margin* wird die potentielle Energie ermittelt, die nötig ist den Roboter entlang einer virtuellen Achse so lange zu drehen bis dieser umkippt. Die Herleitung ist klar und gut nachzuvollziehen und auch die Verwendung der Energie, die auf den Roboter einwirken muss bis dieser umfällt, ist intuitiv. Allerdings ist die Berechnung nicht ganz einfach, da der Einfluss der Schwerkraft auf die jeweiligen Kippachsen umgerechnet werden muss. Ansonsten sind keine schwierig zu erfassenden Messdaten notwendig. Die *Energie Stability Margin* betrachtet wie die *Static Stability Margin* nur das statische Laufen und ist somit nicht für alle Robotersysteme und Lokomotionsarten geeignet. Sie berücksichtigt jedoch sehr gut den Einfluss der Schwerpunkthöhe und kann gut normalisiert werden (*Normalised Energie Stability Margin*).

Dabei wird die potentielle Energie mit der Gewichtskraft des Roboters normiert. Leider verschwindet durch diese Normierung der Einfluss des Gewichts auf die Stabilität. Auch wenn *Hirose et al.* in ihrer Arbeit argumentieren, dass auf einen großen Roboter größere Störkräfte wirken, darf dies angezweifelt werden [96]. Da zum Beispiel Einflussfaktoren wie der Wind oder herabfallende Steine nicht mit der Größe des Roboters skalieren. Die *Normalised Energie Stability Margin* sowie die *Static Stability Margin* werden aufgrund der fehlenden Dynamik nicht als Kriterium für diese Arbeit dienen können.

Die *Dynamic Stability Margin* ist die konsequente Weiterentwicklung der klassischen *Static Stability Margin*. Der Schwerpunkt wird anstatt nur entlang des Gravitationsvektors hier entlang eines resultierenden Kraftvektors auf die Fußpunktebene projiziert. In diesem Vektor können alle dynamischen Effekte berücksichtigt werden. Um all diese Effekte erfassen und berücksichtigen zu können, müssen deutlich umfangreichere Messdaten aufgenommen werden. Allerdings müssen für alle dynamischen Stabilitätskriterien die inertialen Kräfte über die Gelenkwinkelbeschleunigungen sowie externe Störkräfte, Momente und die Richtung der Schwerkraft zu jedem Zeitpunkt gemessen werden. Bei der *Dynamic Stability Margin* ist der Einfluss eines erhöhten Schwerpunkts nicht explizit berücksichtigt. Ebenso fehlt eine Normierung dieses Kriteriums. Aufgrund dieser Eigenschaften wird dieses Kriterium nicht weiter bei der Entwicklung einer systemunabhängigen Metrik betrachtet.

Die *Tumble Stability Margin* betrachtet ähnlich wie die *Energie Stability Margin* die möglichen Kippachsen und berechnet, welches Kippmoment benötigt wird, um den Roboter entlang dieser virtuellen Rotationsachsen umzukippen. Es wird nicht mehr nur die potentielle Kippenergie, sondern auch dynamische Effekte werden bei der Kippmomentbestimmung modelliert. Um alle dynamischen Effekte berücksichtigen zu können, müssen diese Daten messtechnisch aufwändig erfasst werden. Die *Tumble Stability Margin* unterscheidet gut die Stabilität von Robotern mit unterschiedlich hohen Schwerpunkten. Die Berechnung des Kippmoments in Formel 4.12 sieht einfach aus, ist aber um alle Kräfte und Momente richtig zu bestimmen im Detail relativ komplex. Die Normierung anhand der Gewichtskraft macht dieses Kriterium trotz der umfangreicheren Berechnung zu einem interessanten Kandidaten für den Vergleich verschiedener Robotersysteme.

Der *Zero Moment Point* ist ein dynamisches Kriterium, das in der Praxis vor allem von zweibeinigen Robotersystemen verwendet wird. Um den *Zero Moment Point* zu bestimmen, sind entweder gute Kraftmesssensoren in den Füßen oder Momentensensoren in allen Gelenken notwendig. Robuste, hochwertige Kraft- und Momentensensoren sind jedoch kostspielig und somit oft nicht verfügbar. Weiter hat der *Zero Moment Point* große Schwierigkeiten mit unebenen Gelände. Wie *Yonda et al.* in [233] gezeigt haben und auch aus den Gleichungen 4.21 und 4.22 zu sehen ist, müssen alle Bodenkontakte auf einer Ebene liegen, damit die entsprechenden Momente zu Null werden können. Das schränkt den *Zero Moment Point* auf den Einsatz auf ebenem Gelände ein. Dies ist für zweibeinige, humanoide Roboter, die in menschlichen Umgebungen eingesetzt werden sollen, keine große Einschränkung. Für mehrbeinige Laufroboter, die vor allem in schwierigem Gelände eingesetzt werden sollen, ist das ein Ausschlusskriterium für den *Zero Moment Point*. Ebenso fehlt eine Normierung um verschiedene Systeme miteinander vergleichen zu können, auch wenn die Angabe des geometrischen Stabilitätsabstands in mm für Entwickler sowie Anwender intuitiv und gut verständlich ist.

Die *Force Angle Stability Margin* ist ein dynamisches Kriterium ähnlich zu der *Tumble Stability Margin*, bei dem ebenfalls alle möglichen Kippachsen untersucht werden. Hier wird jedoch der *Kippwinkel* betrachtet, der bereits eine Normierung für verschiedene Robotersysteme darstellt. Der *Kippwinkel* wird

zwischen dem resultierenden Kraftvektor und dem Vektor zwischen dem Schwerpunkt und der Kippachse geometrisch ermittelt. Die Berechnung dieses *Kippwinkels* ist im allgemeinen dreidimensionalen Fall relativ schwierig und umfangreich, basiert aber auf rein geometrischen Überlegungen. Der *Kippwinkel* berücksichtigt die Höhe des Schwerpunkts. Außerdem besteht das Kriterium aus einem zweiten Term, dem Betrag des resultierenden Kraftvektors, der auf den Schwerpunkt wirkt. Somit können auch Manipulationskräfte und die Masse bzw. Gewichtskraft berücksichtigt werden. Die Erfassung der dynamischen Effekte ist zwar wie bei allen dynamischen Kriterien aufwändig, aber die *Force Angle Stability Margin* ist dennoch aufgrund der vielen guten Eigenschaften ein guter Kandidat für die Entwicklung eines roboterunabhängigen Stabilitätskriteriums.

Als letztes wird die *Normalised Dynamic Energy Stability Margin*, eine Erweiterung der *Energy Stability Margin*, nach Garcia et al. [78] diskutiert. Die Erweiterung integriert viele dynamische Effekte. Zusätzlich wird die *Normalised Dynamic Energy Stability Margin* anhand der Gewichtskraft normiert. Die Herleitung und Berechnung ist von allen vorgestellten Kriterien am schwierigsten und umfangreichsten. Dennoch kann das Kriterium gut für statische wie dynamische Laufbewegungen verwendet werden und berücksichtigt auch den Einfluss der Höhe des Schwerpunkts. Die *Normalised Dynamic Energy Stability Margin* ist ebenfalls ein guter, potentieller Kandidat für ein roboterunabhängiges Stabilitätskriterium.

Diskussion der vorgestellten Geschwindigkeitsmetriken Der Vergleich der Geschwindigkeit zwischen verschiedenen Lebewesen oder auch Robotern ist wichtig um die Effektivität kinematischer Strukturen sowie Beintrajektorien bewerten zu können. Aber auch für die Konzeption neuer, mehrbeiniger Laufroboter mit verbesserten Kinematiken sind Geschwindigkeitsmetriken wichtig. Überraschenderweise gibt es insbesondere im Robotik Fachbereich wenig Vorarbeiten, die sich mit der Normierung der Laufgeschwindigkeit befassen um einen Vergleich zwischen verschiedenen Robotern zu ermöglichen. In dieser Diskussion sollen die in Abschnitt 4.2 vorgestellten Ansätze hinsichtlich der Entwicklung einer Geschwindigkeitsnormierung für mehrbeinige Laufroboter verglichen und bewertet werden.

Die am häufigsten anzutreffende Geschwindigkeitsangabe bei Tieren, Insekten aber auch Laufrobotern ist die Angabe einer *metrischen Geschwindigkeit* in m/s. Diese Angabe ist physikalisch korrekt, dennoch erscheint der Vergleich zwischen unterschiedlich großen Systemen unfair. Eine Amerikanische Kakerlake (*Periplaneta americana*) kann z.B. bis zu 0,8 m/s schnell laufen [63]. Der gemeine Seitenfleckleguan (*Uta stansburiana*) erreicht eine Laufgeschwindigkeit von 1,0 m/s [68]. Abgesehen davon, dass die *metrische Geschwindigkeit* der Kakerlake in diesem Fall fast gleich schnell ist, ist die Laufleistung hinsichtlich der Geschwindigkeit noch beeindruckender, wenn man die Größenverhältnisse betrachtet. Die reine *metrische Geschwindigkeit* ist nicht geeignet für den systemunabhängigen Vergleich von Lokomotionsgeschwindigkeiten.

Die *Referenzgeschwindigkeit* ist über eine Normierung anhand eines Referenzwertes definiert. Somit sind alle *Referenzgeschwindigkeiten* einheitenlos und können auch als Prozentangaben zu der Referenzangabe interpretiert werden. Die Wahl des Referenzwertes korreliert nicht mit den Größenunterschieden oder kinematischen Unterschieden zwischen den verschiedenen Robotern, sondern bezieht sich auf eine Referenzgröße, die Größe der Systeme spielt keine Rolle. Vergleiche zwischen verschiedenen Systemen werden durch die *Referenzgeschwindigkeit* nicht besser möglich. Der Vorteil, dass die *Referenzgeschwindigkeit* einheitenlos ist, reicht nicht um sie als Kandidat für eine zu entwickelnde Geschwindigkeitsmetrik im Rahmen dieser Arbeit näher in Betracht zu ziehen.

Die *Geschwindigkeit pro Körperlänge* nutzt eine Normierung anhand der Ausdehnung des Körpers in Laufrichtung (X-Dimension der Größe) und erlaubt es so Geschwindigkeiten in Relation zueinander zu setzen. Vergleicht man dort die Kakerlake mit dem Seitenfleckleguan erreicht die Kakerlake Werte von beachtlichen 50 bodylength/s gegenüber immer noch guten 20 bodylength/s [76][68]. Hier wird die Geschwindigkeitsleistung der Kakerlake deutlich. Jedoch ist die Definition der Körperlänge nicht eindeutig und führt bei der Normierung zu Problemen. Wenn es um die Laufleistung geht interessiert ein langer Schwanz wie bei Reptilien oder ein Abdomen wie bei Insekten nicht und sollte ebenso wie der Kopf nicht bei der Normierung berücksichtigt werden. Abgesehen von der Problematik der korrekten Bestimmung der Körperlänge, ist *Geschwindigkeit pro Körperlänge* trotzdem ein guter Kandidat für die Entwicklung einer systemunabhängigen Geschwindigkeitsmetrik.

Die *normalisierte Geschwindigkeit aus der Biologie* nutzt die Schulterhöhe und die Fallbeschleunigung um aus der aktuellen Geschwindigkeit eine einheitenlose Metrik zu definieren. Durch die Normierung anhand der Schulterhöhe wird ebenfalls eine wichtige kinematische Kenngröße verwendet um die Geschwindigkeit zwischen verschiedenen Systemen vergleichbar zu machen. Die Schulterhöhe korreliert zur Beinlänge und damit zur Größe des Lokomotionsapparates. Die Körperlänge spielt in dieser Metrik keine direkte Rolle. Diese Metrik lehnt sich an die *Froude Number* an und wird in der Biologie verwendet um Ähnlichkeiten bei der Lokomotion verschiedener Arten sichtbar zu machen. Bisher wird diese normalisierte Geschwindigkeit in der Robotik nicht verwendet, obwohl sie großes Potential hätte unterschiedliche Systeme vergleichbar zu machen. Die *normalisierte Geschwindigkeit aus der Biologie* ist ein interessanter Kandidat für eine systemunabhängige Geschwindigkeitsmetrik und soll in dieser Arbeit tiefergehend analysiert werden.

Diskussion aktueller Energieeffizienzmetriken Die Energieeffizienz mehrbeiniger Laufroboter kann rein von den involvierten physikalischen Effekten her nicht an die Effizienz von fahrenden, radbasierten Systemen heranreichen. In der Arbeit von *Kuo* wird hergeleitet, dass selbst bei einer hohen Rückgewinnung von Energie durch elastische, federnde Elemente das Laufen durch die zyklischen negativen und positiven Beschleunigungen nicht die Effizienz eines reibungsarmen Rades erreichen kann [135]. Laufen ist in der Natur dennoch sehr effizient, da Muskeln einen sehr hohen Wirkungsgrad besitzen. Unabhängig davon, ob die absolute Effizienz jemals an radgetriebene Systeme heranreichen kann, ist es dennoch wichtig die Energieeffizienz von Laufrobotern weiter zu steigern. Mit den sich stets weiterentwickelnden Fähigkeiten von Laufrobotern, wird deren Einsatzdauer stets wichtiger für reale Anwendungen. Bei der Diskussion der verschiedenen Effizienzkriterien soll vor allem darauf geachtet werden, ob die Definitionen klar sind, ob die benötigten Messdaten einfach zur Verfügung stehen und ob die Metrik sich auf andere Systeme übertragen lässt.

Die *Specific Resistance* ist eine der am häufigsten eingesetzten Metriken um die Effizienz von Laufrobotern zu vergleichen. Die *Specific Resistance* soll vom Begriff her den Gesamtwiderstand angeben, die eine bestimmte Lokomotionsform erfährt. Durch die Normierung anhand der Geschwindigkeit und der Gewichtskraft ist die *Specific Resistance* einheitenlos und kann gut verwendet werden verschiedene Systeme miteinander zu vergleichen. Typischerweise werden Grafiken mit der *Specific Resistance* gegenüber der Masse oder der Geschwindigkeit (siehe Abbildung 4.17) für Roboter, Tiere und technische Systeme verwendet um die Effizienz eines Systems in Relation zu anderen darstellen zu können. Bei Laufrobotern wird meist die integrierte Form mit der Energie und Distanz (siehe Gleichung 4.50) verwendet, da die Distanz einfacher zu

bestimmen ist als die aktuelle Laufgeschwindigkeit. Dies liegt vor allem daran, dass die Laufgeschwindigkeit im Gegensatz zu den Annahmen von *Gabrielli und van Karman* bei Robotern nicht konstant ist [218]. Ein weiteres Problem mit der *Specific Resistance* ist die fehlende eindeutige Definition der zu normierenden Energie. Die unterschiedlichen Interpretationen der zu messenden Energie wird im Abschnitt zur *Cost of Transport* detaillierter diskutiert. Trotz dieser Ungenauigkeiten in der Definition ist die *Specific Resistance* eine sehr wichtige Metrik, die bei der Entwicklung einer roboterunabhängigen Energieeffizienzmetrik berücksichtigt werden soll.

Die *Cost of Transport* ist identisch zu der *Specific Resistance* und wird mit der gleichen Normierung anhand der Distanz und Gewichtskraft definiert (siehe Gleichung 4.55). Allerdings wird der Begriff *Cost of Transport* in der Robotik deutlich häufiger verwendet. Vermutlich weil er leichter verständlich ist und intuitiv klarer ist. Wie bei der *Specific Resistance* werden oft Grafiken erstellt, die einen Vergleich vieler verschiedener Systeme ermöglichen (siehe Abbildung 4.19). Die Problematik mit der nicht eindeutigen Energiedefinition bleibt bei der *Cost of Transport* bestehen, wurde aber durch die Definition der *Total Cost of Transport* und der *Mechanical Cost of Transport* verbessert. In zahlreichen Arbeiten werden sogar explizit beide Werte angegeben um zum einen ein Bewusstsein dafür zu schaffen, dass es eine nicht eindeutige Definition gibt und zum anderen die großen Unterschiede zwischen den beiden Werten zu verdeutlichen. *Soek et al.* zeigen, dass 76% der *TCoT* Wärmeverluste sind und nicht zur eigentlichen Lokomotion beitragen [201]. Die *MCoT* ist somit deutlich kleiner. Dies ist der Beleg dafür, dass es eigentlich nicht zulässig ist die thermischen Verluste bei der Betrachtung der Energieeffizienz zu vernachlässigen. Diese Verluste, die mehr als Hälfte der benötigten Energie ausmachen können, hängen zudem auch von Lokomotionsparametern ab. Die *Total Cost of Transport* und die *Mechanical Cost of Transport* sollen als Spezialisierung der *Cost of Transport* bei der Entwicklung der neuen Energieeffizienzmetrik berücksichtigt werden.

Die *Cost of Climbing* ist eine Spezialisierung der *Mechanical Cost of Transport*. Sie basiert auf der detaillierten Berechnung verschiedener energetischer Verlustterme: 1. Verluste der elastischen Beine, die mit dem Untergrund interagieren; 2. Verluste durch Reibung und Schlupf; 3. Verluste durch die schwankende, oszillierende Laufgeschwindigkeit. Damit sind diese Berechnung der Energie deutlich detaillierter als bei den meisten anderen Ansätzen, die genau diese Effekte vernachlässigen. Bei der Erweiterung zur *Cost of Climbing* wird die Gleichung der *Cost of Transport* so angepasst, dass auch die benötigte potentielle Energie zum Überwinden der Höhendifferenz berücksichtigt wird. Die Modellierung aller Verlustterme ist interessant, aber auch sehr aufwändig. Der Spezialfall der *Cost of Climbing*, die keinerlei elektrischen Verluste beinhaltet, wird bei der Metrikentwicklung nicht weiter betrachtet.

In der Arbeit von *Nishii* wird ebenfalls eine *Cost of Transport* hergeleitet. Diese *Cost of Transport nach Nishii* basiert auf einer detaillierten Modellierung der mehrbeinigen Laufbewegung. Auch wenn die Herleitung der vier Hauptgleichungen für die mechanische Arbeit während der Schwing- und Stemmphase sowie deren thermische Verluste trotz zahlreicher vereinfachenden Annahmen recht umfangreich ist, sind die resultierenden Gleichungen nur noch abhängig von wesentlichen Lokomotionsparametern. Nicht modelliert werden Verluste durch Schlupf sowie negative Arbeit. Außerdem wird mit einer konstanten Laufgeschwindigkeit gerechnet. Die Gleichungen eignen sich insbesondere um in theoretischen Analysen die Effizienz verschiedener Laufmuster zu bewerten und so diese über eine Anpassung der Kinematik zu optimieren. Die *Cost of Transport nach Nishii* lässt sich auf andere Roboter übertragen, hat jedoch einige vereinfachende Annahmen, die den Einsatz für viele Robotersysteme ausschließen. Somit kommt die *Cost of Transport nach Nishii* nicht in die nähere Auswahl der Kriterien zur Entwicklung einer neuen Energieeffizienzmetrik.

Viele Arbeiten befassen sich mit der Berechnung der mechanischen Energie, die für das Laufen verwendet wird oder mit der Optimierung verschiedener Parameter um die Energieeffizienz zu verbessern. *De Santos et al.* betrachten im Grunde nur den Energieterm der *Cost of Transport* Gleichung und versucht diesen Wert zu minimieren [61]. Dabei konzentriert er sich auf einen sehr speziellen Fall eines sechsbeinigen Laufroboters, der bei konstanter Höhe und konstanter Geschwindigkeit läuft. Ziel ist es in rauem Gelände Fußpunkte zu finden, die einen energetisch optimierten Pfad ergeben. Dieser Ansatz lässt sich, wie so viele andere Arbeiten, aus der Literatur nicht auf viele andere Systeme bzw. Anwendungen übertragen und soll deswegen bei der Metrikenentwicklung nicht weiter betrachtet werden. Weitere Arbeiten befassen sich mit der Schätzung der mechanischen Energie durch externe Tracking Systeme [47]. Insbesondere bei Menschen, Tieren und Insekten ist es nicht möglich die internen Drehmomente oder auch Gelenkwinkelgeschwindigkeiten und -beschleunigungen zu erfassen, so dass über externe Messtechnik diese Daten erfasst werden müssen. Diese Schätzungen der mechanischen Energie sind vor allem für natürliche Systeme wichtig, spielen bei der weiteren Diskussion aber nur eine untergeordnete Rolle.

Die *Metabolic Cost of Transport* wird sehr häufig in der Biologie verwendet um die Lokomotionsleistung verschiedenster Arten miteinander zu vergleichen. Im Grunde ist die Gleichung der *Metabolic Cost of Transport* identisch mit der Gleichung für die *Specific Resistance* oder der *Cost of Transport* (vergleiche Gleichungen 4.80 und 4.49). Ein wesentlicher Unterschied ist die Bestimmung der *Metabolic Rate*, also der Leistungsaufnahme. Diese muss mit umfangreichen Messaufbauten, externen Messsystemen und vielen Annahmen aufwändig geschätzt werden. Die weite Verbreitung der *Metabolic Cost of Transport* in der Biologie unterstreicht die Relevanz der *Cost of Transport* für die Entwicklung einer neuen, roboterunabhängigen Metrik zur Bestimmung der Energieeffizienz.

4.3. Abstraktion und Modellbildung

Viele der diskutierten Metriken treffen Annahmen um die Herleitung oder komplexe Zusammenhänge zu vereinfachen. Die Annahmen oder Abstraktionen dienen aber auch dazu sich von einem konkreten System zu lösen und die Metrik auf eine größere, breitere Anzahl an Systemen übertragen zu können. Dieser Ansatz ist gut, wurde aber bei den vorgestellten Metriken nicht mit Rücksicht auf die Übertragbarkeit auf andere Laufroboter eingesetzt. In diesem Abschnitt wird vor der Entwicklung neuer Metriken ebenfalls eine Abstraktion vorgenommen und ein Lokomotionsmodell entwickelt, das auf alle mehrbeinigen Tiere, Insekten, Spinnen und Laufroboter übertragen werden kann. Diese Abstraktion enthält ebenfalls einige vereinfachende Annahmen, betrachtet jedoch stets, dass alle drei Leistungskenngrößen Stabilität, Geschwindigkeit und Energieeffizienz im Modell berücksichtigt werden und dass die Abstraktion übertragbar bleiben muss.

4.3.1. Modellkenngrößen

Obwohl sich das mehrbeinige Laufen an vielen Stellen stark unterscheidet, gibt es dennoch Gemeinsamkeiten. Diese sind auf einige invariante Kenngrößen zurück zu führen, denen grundlegende, wiederkehrende physikalische Effekte zugrunde liegen. An dieser Stelle sollen die identifizierten, invarianten Kenngrößen vorgestellt bzw. hergeleitet werden.

Schwerpunkt des Systems (CoM) Jedes laufende Lebewesen oder technische System besitzt ein eindeutiges Gewicht und einen dazugehörigen Schwerpunkt. Der Schwerpunkt lässt sich genauso wie das Ge-

wicht messtechnisch ermitteln. Zur Bestimmung des Schwerpunktes muss die aktuelle, genaue Massenverteilungen inklusive die Stellung aller Beine bekannt sein. Der Schwerpunkt ist eindeutig definiert und kann somit nur schwer falsch interpretiert werden. Während des Laufens verschiebt sich der Schwerpunkt in verschiedene Richtungen (x,y,z) . Der Schwerpunkt $CoM(x,y,z)$ ist eine veränderliche Modellkenngröße. Das Gewicht m_r ist für die kurze Dauer eines Experiments eine statische, invariante Kenngröße. Im Allge-

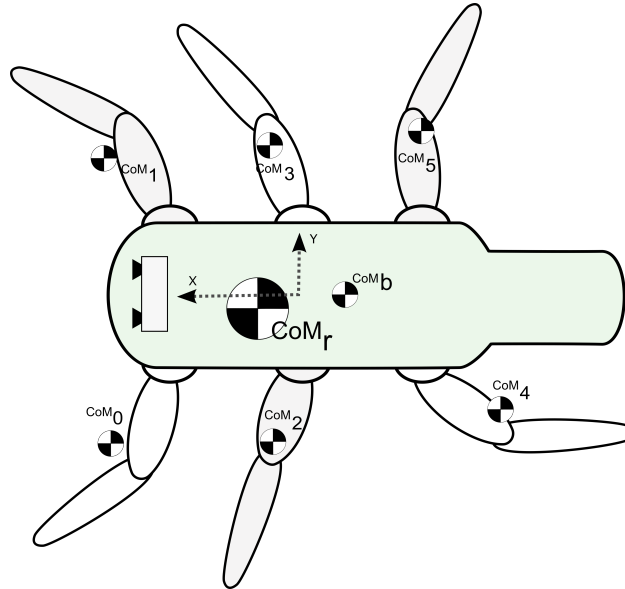


Bild 4.24.: Dynamische Berechnung des Roboterschwerpunktes CoM_r .

meinen lässt sich der Schwerpunkt für technische Systeme wie Roboter gut schätzen. Wenn die jeweiligen Segment-Schwerpunkte pro Bein gewichtet summiert werden, ergibt sich pro Bein ein beweglicher Bein-Schwerpunkt (CoM_i) mit der Beinmasse m_i . Die gewichtete Summe aller Beinschwerpunkte zusammen mit dem Produkt des unbeweglichen Schwerpunktes des Zentralkörpers CoM_b und der Masse des Körpers m_{body} ergibt den dynamischen Schwerpunkt des Roboters CoM_r (siehe Abb. 4.24).

$$CoM_r = \sum_i \frac{CoM_i \cdot m_i + CoM_b \cdot m_{body}}{m_r} \quad (4.81)$$

Der Schwerpunkt liegt oft in der Nähe des geometrischen Mittelpunkts des Roboters. Durch die Bewegung der Beine und einem oft nicht ganz symmetrischen Aufbau des Roboters kann die Abweichung vom geometrischen Mittelpunkt jedoch auch erheblich sein. Im Gegensatz zu der Lauf- oder Rumpfhöhe des Systems berücksichtigt die Z-Komponente des CoM_r z.B. auch den Effekt von erhöhten Sensoraufbauten. Insbesondere für die späteren Stabilitätsbetrachtungen ist es wichtig den aktuellen Schwerpunkt des Roboters genau zu kennen. Der Schwerpunkt ist eine gute Modellkenngröße um das System unabhängig von seiner Morphologie bzw. Kinematik, Höhe, Größe oder auch Beinlänge zu charakterisieren.

Vorderster (AEP), hinterster Fußpunkt (PEP) und Schrittweite Jedes Bein eines laufenden Systems führt zyklische Schwing- und Stembewegungen aus. Die Beine berühren während jeder Stemmphase den Boden, unabhängig von allen sonstigen Systemeigenschaften. Am Ende der Schwingphase und zu Beginn der Stemmphase berührt der Fuß am P_{AEP} (Anterior Extreme Position - vorderster Fußpunkt) erstmalig den Boden. Am Ende der Stemmphase befindet sich der Fuß an dem P_{PEP} (Posterior Extreme Position -

hinterster Fußpunkt) und berührt letztmalig den Boden. Ab dann beginnt die Schwingphase des Laufzyklus. Im Abschnitt 2.4 sowie in der Abbildung 2.5 werden der *AEP* und *PEP* erklärt und dargestellt. Jedes Bein i eines laufenden Systems besitzt jeweils eigene P_{AEP_i} und P_{PEP_i} Punkte. Bei der Modellbildung soll jedoch angenommen werden, dass die P_{AEP_i} und P_{PEP_i} Punkte auf der linken und rechten Seite eines Beinpaars gespiegelt identisch sind. Der Abstand d_{step_i} des P_{AEP_i} zum P_{PEP_i} wird im Allgemeinen auch als *Schrittweite* d_{step_i} bezeichnet.

$$S_{step_i} = |P_{AEP_i} - P_{PEP_i}| \quad (4.82)$$

Bei der Modellbildung wird angenommen, dass alle Beine mit der gleichen, mittleren *Schrittweite* S laufen. Dies ist in der Natur jedoch eher die Ausnahme, da die *Schrittweiten* sich zwischen den Beinpaaren in der Regel merklich unterscheiden. In der Robotik laufen die meisten Roboter wiederum mit einer identischen *Schrittweite* um mechanische Spannungen zu minimieren. Falls unterschiedliche *Schrittweiten* verwendet werden, soll zur Modellbildung die mittlere *Schrittweite* S verwendet werden. Die mittleren *Schrittweite* S für n Beine kann einfach ermittelt werden:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{step_i} \quad (4.83)$$

Die *Schrittweite* hängt von der Morphologie, der Kinematik, dem Laufmuster, der Laufgeschwindigkeit und vielen weiteren Parametern ab. Die P_{AEP_i} und P_{PEP_i} Punkte und damit die *Schrittweite* sind veränderliche Kenngrößen, die sich von einem Schritt-Zyklus zum nächsten ändern können. Dennoch sind alle drei Kenngrößen wichtige Elemente jedes Laufvorgangs und klar definiert. Diese drei Modellkenngrößen bilden einen zentralen Teil des Lokomotionsmodells. Die Veränderlichkeit der Modellkenngrößen wird die Abstraktionsfähigkeit des Lokomotionsmodells verbessern.

Erweiterte Aufstandsflächen A_{ext} Die normale Aufstandsfläche wird durch die Fußpunkte P_i mit Bodenkontakt definiert (siehe auch Abschnitt 2.4). Die erweiterte Aufstandsflächen A_{ext} wird anhand der vordersten (P_{iAEP}) und hintersten Fußpunkte (P_{iPEP}) aller i Beine aufgespannt. Im Gegensatz zur aktuellen Aufstandsfläche, die nur von den Füßen mit Bodenkontakt aufgespannt wird, berücksichtigt die erweiterte Aufstandsfläche A_{ext} stets alle Beine. Alle Punkte eines Zyklus P_{iAEP} und P_{iPEP} bilden zusammen die Menge G :

$$G = \{P_{1AEP}, P_{1PEP}, \dots, P_{NAEP}, P_{NPEP}\} \quad \text{für einen Roboter mit } N \text{ Beinen.} \quad (4.84)$$

Für einen sechsbeinigen Laufroboter ist $|G| = 12$ und für ein vierbeiniges System entsprechend $|G| = 8$. Die erweiterte Aufstandsfläche ist definiert als konvexe Hülle aller Punkte in G :

$$A_{ext} = Conv(G) \quad (4.85)$$

Die erweiterte Aufstandsfläche ist eine veränderliche Modellkenngröße, da sich die P_{iAEP} und P_{iPEP} z.B. mit der *Schrittweite* verändern. Bei einer konstanten Laufgeschwindigkeit ändert sich die erweiterte Aufstandsfläche in der Regel nicht. Für den stationären Fall, der Roboter steht mit $V_x = 0$ auf der Stelle, sind die erweiterte Aufstandsfläche und die aktuelle, normale Aufstandsfläche identisch. Die Herleitung der erweiterten Aufstandsfläche ist auch in der Abbildung 4.25 dargestellt. Zusätzlich ist in der Abbildung 4.25 die aktuelle Aufstandsfläche als gestrichelte blaue Linie dargestellt um die Unterschiede klar hervorzuheben. Die erweiterte Aufstandsfläche bietet einige Vorteile bei der Abstraktion der mehrbeinigen Lokomotion.

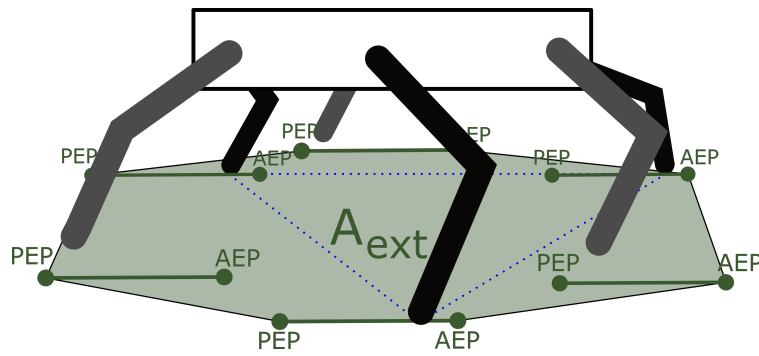


Bild 4.25.: Erweiterte Aufstandsfläche A_{ext} : Konvexe Hülle aller Punkte P_{AEP} und P_{PEP} (grüne Fläche). Der Unterschied zur Aufstandsfläche (blau gestrichelt) ist deutlich zu erkennen.

Die erweiterte Aufstandsfläche skaliert zusammen mit der Größe des Systems. Allerdings ist sie nur abhängig vom Lokomotionsapparat bzw. dem Abstand zwischen dem vordersten und hintersten Beinpaar. Somit ist die Körperlänge indirekt über den Abstand dieser Beinpaare enthalten, jedoch mit einer eindeutigen Definition. Es muss weder genau bekannt sein, wo der Lokomotionsapparat anfängt oder aufhört, noch müssen Sensoraufbauten oder Extremitäten berücksichtigt werden. Die Fußpunkte, die die Basis für die erweiterte Aufstandsfläche bilden, können jederzeit messtechnisch einfach und eindeutig erfasst werden. In der Regel sind die Fußpunkte über die Kinematik des Roboters zu jedem Zeitpunkt hoch genau bekannt. Außerdem wird bei der erweiterten Aufstandsfläche auch die Schulterhöhe bzw. die Beinlänge über die *Schrittweite* berücksichtigt. Dabei wird nicht die kinematische oder anatomische Beinlänge, sondern die Strecke vom Schwerpunkt zum Bodenkontakt verwendet, was wiederum eine eindeutige, einfache Definition der Beinlänge ist (effektive Beinlänge). Nur die effektive Beinlänge trägt letztendlich zur Lokomotion bei. Die erweiterte Aufstandsfläche A_{ext} ist eine wichtige Modellkenngröße, die viele Vorteile bei der Abstraktion zwischen verschiedenen Robotersystemen bietet.

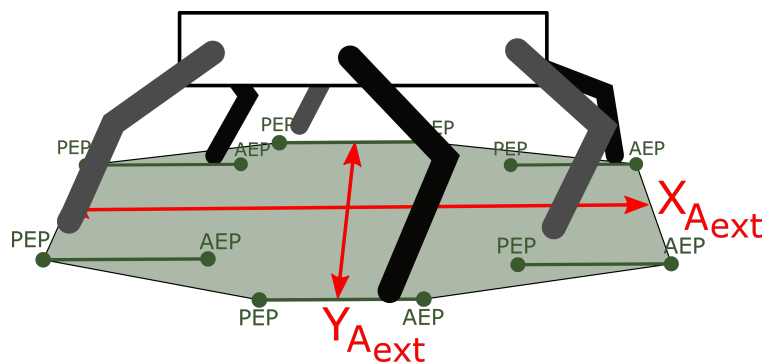


Bild 4.26.: Ausdehnung $X_{A_{ext}}$ und $Y_{A_{ext}}$ der erweiterten Aufstandsfläche A_{ext} .

Ausdehnung der erweiterten Aufstandsflächen $X_{A_{ext}}$, $Y_{A_{ext}}$ Aus der erweiterten Aufstandsfläche werden zwei zusätzliche Modellkenngrößen abgeleitet. Die maximale Ausdehnung der erweiterten Aufstandsfläche in X- bzw. Y-Richtung: $X_{A_{ext}}$ und $Y_{A_{ext}}$. Auch in diesen beiden Kenngrößen sind indirekt die Körperlänge des laufenden Systems sowie über die AEP- und PEP-Punkte die Beinlängen bzw. die Schulterhöhe enthalten. Uneindeutigkeiten durch Extremitäten wie Kopf oder Schwanz sowie Sensor-Aufbauten können beseitigt werden.

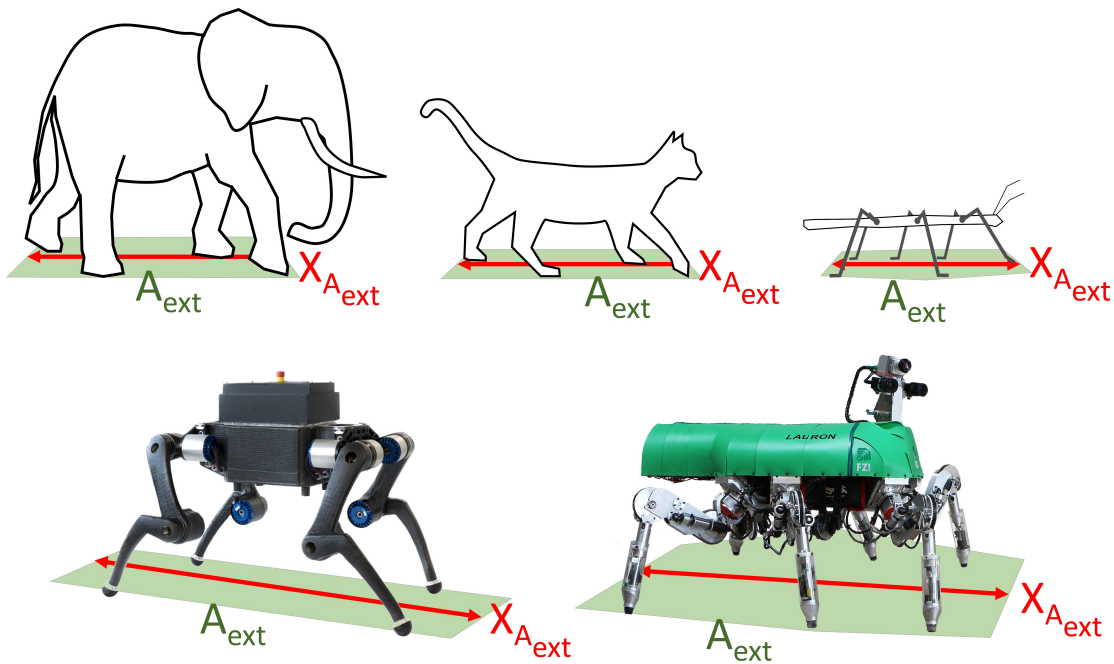


Bild 4.27.: Vergleich verschiedener Lokomotionsapparate anhand der erweiterten Aufstandsfläche A_{ext} sowie dessen X-Ausdehnung $X_{A_{ext}}$: (oben links) Stabheuschrecke, (oben mittig) Katze, (oben rechts) Elefant, (unten links) Laufroboter ANYmal (modifiziert aus Quelle [105]), (unten rechts) Laufroboter LAURON V.

Die Abbildung 4.26 zeigt die einfache Herleitung der Modellkenngrößen $X_{A_{ext}}$ und $Y_{A_{ext}}$. Wie die erweiterte Aufstandsfläche sind diese Modellkenngrößen nicht konstant und verändern sich vor allem mit der *Schrittweite*. Die erweiterte Aufstandsfläche bzw. deren Ausdehnung kann jedoch für vier-, sechs- oder mehrbeinige Systeme stets eindeutig bestimmt werden. Dies bildet eine wichtige Grundlage für die Vergleichbarkeit bzw. Abstraktion zwischen den Systemen. In der Abbildung 4.27 sind beispielhaft die erweiterte Aufstandsfläche A_{ext} sowie die Ausdehnung in X-Richtung $X_{A_{ext}}$ für sehr unterschiedliche, mehrbeinige Systeme dargestellt.

Ein wichtiger Hinweis zu der Abbildung 4.27 ist, dass die erweiterte Aufstandsfläche nicht aus einer einzelnen Momentaufnahme erstellt werden kann. Die Fußpunkte der Tiere, Insekten und Roboter müssen über einen kompletten Laufmuster-Zyklus beobachtet werden. Eine Momentaufnahme zeigt nie alle Beine gleichzeitig in den extremen, äußersten Fußpunktpositionen. Aus diesem Grund sind die eingezeichneten Flächen in Abbildung 4.27 auch stets größer als die aktuellen Fußpunkte vermuten lassen. Die Ausdehnung der erweiterten Aufstandsflächen ist eine wichtige Modellkenngröße, die zur Normierung verwendet werden kann. Im Gegensatz zu der Schulterhöhe oder Körperlänge ist sie eindeutig definiert und beinhaltet sowohl den Einfluss der Beinlänge als auch die Größe des Lokomotionsapparates.

4.4. Entwicklung des abstrakten, mehrbeinigen Lokomotionsmodells

Nachdem die Modellkenngrößen in den vorhergehenden Abschnitten hergeleitet wurden, können diese zu dem Lokomotionsmodell zusammengesetzt werden. Die Konzepte des mehrbeinigen Lokomotionsmodells sind mit der schrittweisen Abstraktion in der Abbildung 4.28 dargestellt. Zunächst wird davon ausgegangen, dass die jeweils äußersten Fußpunkte $P_{i_{AEP}}$ und $P_{i_{PEP}}$ eines realen Robotersystems zusammen mit dessen Laufgeschwindigkeit v_x bekannt sind. Bereits durch diesen ersten Schritt abstrahiert das Modell die Unter-

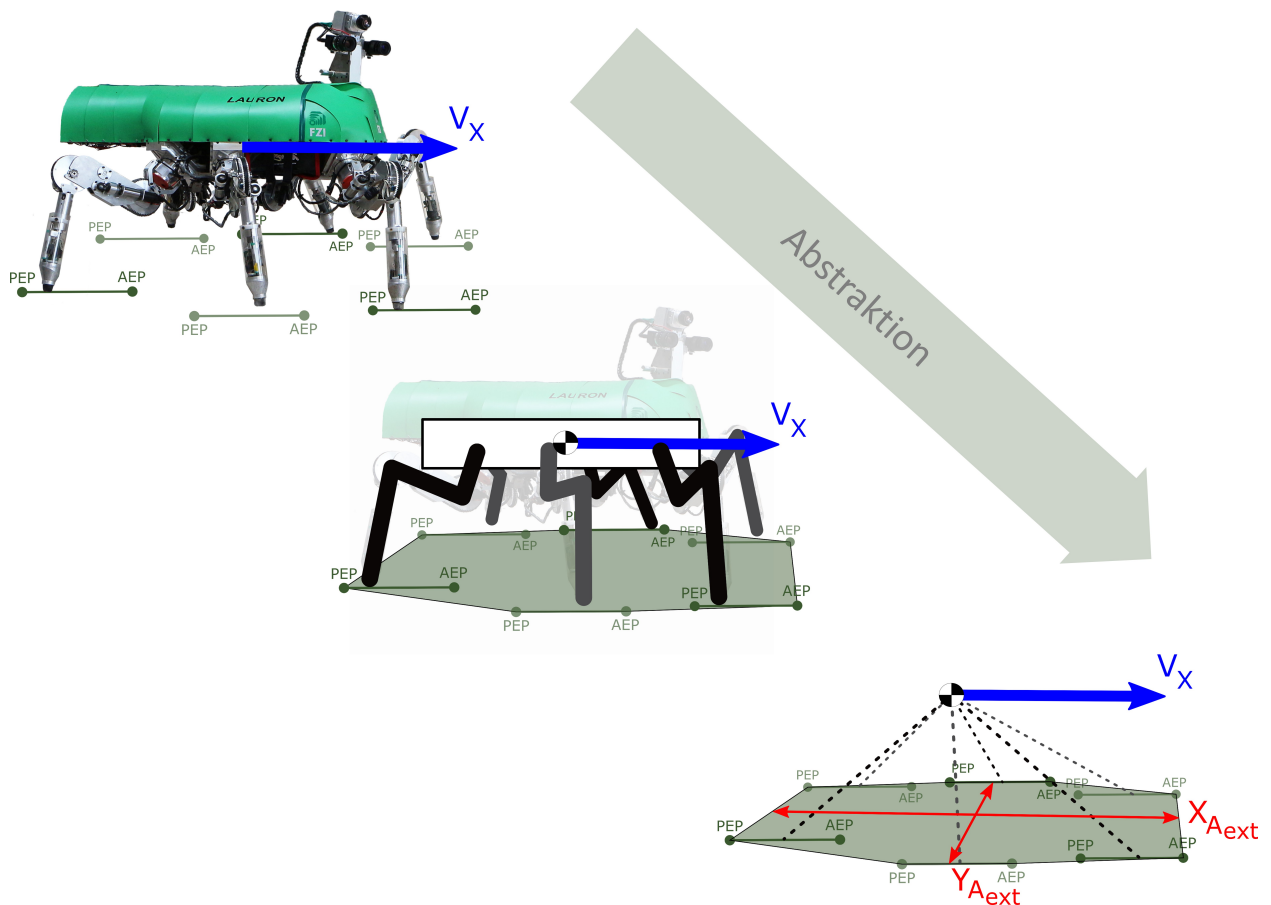


Bild 4.28.: Abstraktion vom detaillierten Robotermodell zum modellbasierten Lokomotionsmodell.

schiede zwischen verschiedenen Robotern und konzentriert sich auf die Gemeinsamkeiten. Durch die Verwendung der äußersten Fußpunkte spielt die konkrete Beinkinematik keine Rolle. Wird aus diesen äußersten Fußpunkten die erweiterte Aufstandsfläche erstellt, kann sogar die Anzahl der Beine weg abstrahiert werden (siehe Mitte der Abbildung 4.28). Im letzten Abstraktionsschritt kann komplett auf den Roboter verzichtet und dieser einfach durch den Roboter-Schwerpunkt modelliert werden. Die Ausdehnung der erweiterten Aufstandsfläche kann anschließend für die Normierung extrahiert werden (siehe rechts in Abb. 4.28).

In der Abbildung 4.29 wird das mehrbeinige Lokomotionsmodell mit allen Kenngrößen dargestellt. Im Wesentlichen besteht das Lokomotionsmodell aus wenigen repräsentativen Größen: dem Schwerpunkt des Roboters (Gewicht und Position) CoM_r , der erweiterten Aufstandsfläche A_{ext} , den aktuellen Fußpunkten P_i , der aktuellen Laufgeschwindigkeit $V(x,y)$ sowie dem aktuellen Energieverbrauch E_R . Weiter werden für die Berücksichtigung dynamischer Effekte noch die externen Kräfte F_R , die auf den Schwerpunkt wirken, berücksichtigt. Das entwickelte Modell bildet die Basis für die neuen, modellbasierten Metriken. Das Modell ist die erfolgreiche Abstraktion von der Größe, dem Gewicht, der Anzahl der Beine und Gelenke sowie Laufmuster bzw. Beintrajektorien.

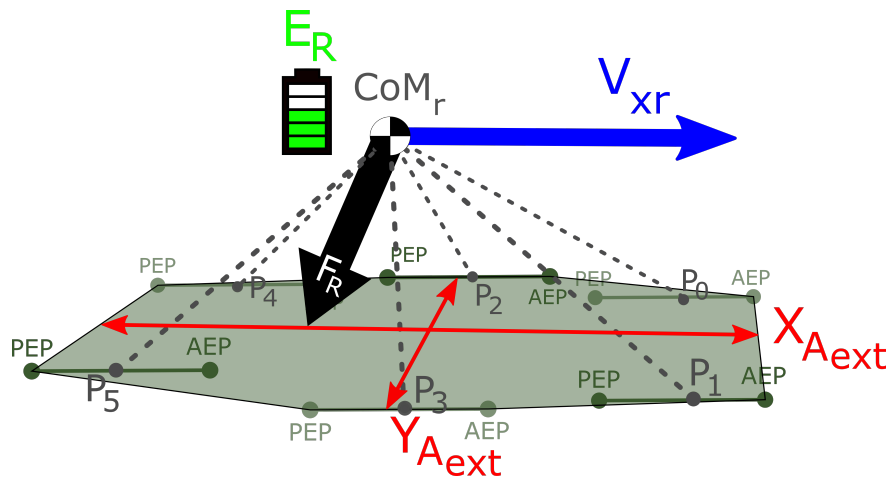


Bild 4.29.: Mehrbeiniges, abstraktes Lokomotionsmodell für mehrbeinige Laufroboter.

4.5. Modellbasierte Metriken für Laufroboter

Basierend auf dem modellbasierten Lokomotionsmodell werden im folgenden Abschnitt mehrere, neue Metriken zur Bewertung der Laufroboter-Leistungskriterien entwickelt. Zunächst wird ausgehend von der kritischen Analyse bisheriger Metriken eine neue Stabilitätsmetrik hergeleitet. Danach wird eine modellbasierte Möglichkeit zur roboterunabhängigen Normierung der Laufgeschwindigkeit vorgestellt. Zuletzt wird basierend auf dem Lokomotionsmodell und der Auseinandersetzung mit bisher bestehenden Normierungsansätzen eine klare, laufrobotergerechte Energieeffizienzmetrik entwickelt.

4.5.1. Modellbasierte, normierte Stabilitätsmetrik

Aus der Diskussion der Stabilitätskriterien im Abschnitt 4.2.6 haben sich drei potentielle Kandidaten als Basis für die Entwicklung einer neuen, modellbasierten Stabilitätsmetrik herauskristallisiert. Die *Tumble Stability Margin (TSM)*, die *Force Angle Stability Margin (FASM)* und die *Normalized Dynamic Energy Stability Margin (NDESM)* sind Kriterien, die mit dynamischen Effekten umgehen können und somit neben der statischen auch für die dynamische Lokomotion eingesetzt werden können. Im Grunde sind die Kriterien ähnlich, da sie jeweils prüfen was notwendig ist, um einen mehrbeinigen Laufroboter um eine virtuelle Kippachse umkippen zu lassen. *Garcia et al.* vergleichen zahlreiche Stabilitätsmetriken und kommen zu dem Entschluss, dass die *FASM* sehr gute, jedoch nicht optimale Ergebnisse liefert [79]. Die *TSM* schneidet in dieser Untersuchung ebenfalls gut, jedoch etwas schlechter als die *FASM* ab. Aus diesem Grund haben die Autoren in späteren Arbeiten die sehr komplexe *NDESM* entwickelt. Die *Tumble Stability Margin* ermittelt das notwendige Kippmoment, die *Force Angle Stability Margin* den Kippwinkel und die *Normalized Dynamic Energy Stability Margin* die Kippenergie. Auch wenn der Name es nicht direkt vermuten lässt, beinhaltet der geometrische Kippwinkel der *Force Angle Stability Margin* alle dynamischen Effekte wie die inertialen, externen Kräfte und Momente. Alle drei Kriterien berücksichtigen außerdem die Höhe des Schwerpunktes und sind zumindest teilweise normiert. Die *Tumble Stability Margin* und *Normalized Dynamic Energy Stability Margin* werden hinsichtlich der Gewichtskraft normiert. Die *Force Angle Stability Margin* ist geometrisch normiert durch die Verwendung eines größenunabhängigen Winkels. Wird der Betrag des resultierenden Kraftvektors F_R der *Force Angle Stability Margin* ebenfalls mit der Gewichtskraft normiert, wie es von *Papadopoulos und Rey* vorgeschlagen wird, verschwindet der Einfluss des Gewichts

bei der *Force Angle Stability Margin* sogar vollständig [162]. Wenn das System proportional skaliert wird, ändert sich der *Kippwinkel* der *Force Angle Stability Margin* entsprechend nicht (siehe Abbildung 4.30). In

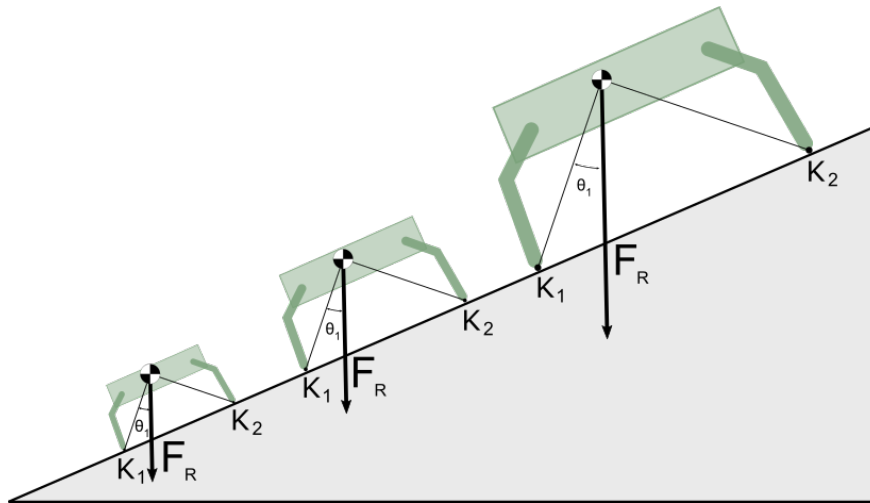


Bild 4.30.: Der *Kippwinkel* θ der *Force Angle Stability Margin* ist skalierungsinvariant.

dem zweiten Term der *Force Angle Stability Margin*, dem Betrag des resultierenden Kraftvektors $|F_R|$, erhöht sich im Falle einer proportionalen Skalierung die Stabilität über die größere Gewichtskraft (siehe auch Gleichung 4.23). Da das Gewicht kubisch zunimmt erhöht sich die Stabilität bei der *Force Angle Stability Margin* bei einer Verdopplung der Größe um den Faktor 8. Diese Steigerung der Stabilität ist jedoch unverhältnismäßig hoch. Bei der *NDESM* und *TSM* verändert sich die Stabilität direkt proportional mit Größe des Roboters. Mit der Größe wird die benötigte Kippenergie bzw. das benötigte Kippdrehmoment größer und somit auch die Stabilität. Diese Kriterien skalieren linear mit der Größe, so dass bei einer Verdopplung der Größe die Stabilität entsprechend auch um Faktor 2 wächst. Dieser Effekt ist trotz der gewichtskraftbasierten Normierung der *NDESM* und *TSM* vorhanden, da sich der effektive Hebelarm bzw. die Höhendifferenz verändern. Der lineare Faktor der *Tumble Stability Margin* und *Normalized Dynamic Energy Stability Margin* ist zwar intuitiv, aber spiegelt nicht den gewünschten Effekt wieder. Die Steigerung der Stabilität basiert auf geometrischen Eigenschaften und ist vollkommen unabhängig von dem Gewicht. In der Praxis reduziert sich durch das größere Gewicht die Anfälligkeit gegenüber externen Störeinflüssen. Anhand eines konkreten Beispiels soll die Bedeutung des Gewichts kurz diskutiert werden. Wenn zwei identische Laufroboter nur aus unterschiedlichen Materialien gebaut würden, wären diese in Abhängigkeit von den Materialdichten unterschiedlich schwer. Die *TSM*, die *NDESM* als auch die normierte *FASM* würden für beide Roboter die identische Stabilität ermitteln und könnten somit den signifikanten Unterschied zwischen den Systemen überhaupt nicht sichtbar machen. Die einfache Normierung anhand der Gewichtskraft ist für die Bewertung der Stabilität somit nicht zielführend. Keinerlei Normierung anhand der Gewichtskraft wiederum schadet der Übertragbarkeit des Kriteriums auf viele verschiedene Systeme.

Da die nicht-normierte *Force Angle Stability Margin* die unabhängige Interpretation des *Kippwinkels* und der Gewichtskraft ermöglicht, soll dieses ursprüngliche Kriterium zu der *Distance Force Stability Measure* weiterentwickelt werden, bei dem beide Aspekte der Stabilität stets vorhanden bleiben.

Distance Force Stability Measure (DFS) Bei der Berechnung der *Distance Force Stability Measure* sollen zwei Fälle unterschieden werden: Erstes soll die aktuelle Stabilität während des Laufens ermittelt

werden. Des Weiteren soll die kinematische Grundstabilität betrachtet werden.

Stabilität während des Laufens Die aktuelle $DFSM_i$ wird ähnlich zu der *Force Angle Stability Margin* wie folgt pro Kippachse i berechnet:

$$DFSM_i = \left(\begin{array}{c} \sin(\theta_i) \\ |F_R| \end{array} \right) \quad (4.86)$$

Der *Kippwinkel* θ_i wird dabei analog zu der *Force Angle Stability Margin* ermittelt (siehe Abschnitt 4.2.1):

$$\theta_i = \sigma_i \cos^{-1}(\hat{F}_{iCoM} \cdot \hat{l}_i) \quad i = 1, \dots, n \quad (4.87)$$

Die Erweiterung liegt zum einen darin, dass die *geometrische* und *kraftbasierte Stabilität* unabhängig erhalten bleiben.

$$\text{geometrische Stabilität} := \sin(\theta_i) \quad (4.88)$$

$$\text{kraftbasierte Stabilität} := |F_R| \quad (4.89)$$

Weiter wird der *Kippwinkel* der *FASM* durch die Sinusfunktion auf einen einfachen, interpretierbaren Wertebereich $[0;1]$ skaliert. Beide Werte können zusammen anschaulich interpretiert werden. Die Multiplikation der *geometrischen* und *kraftbasierten Stabilitäten* bildet zusammen die sogenannte *Kippdistanz* Δ_i . Dies ist die kürzeste Strecke von der Spitze des resultierenden Kraftvektors F_R zum Richtungsvektor der Linie l_i (Verbindung vom Schwerpunkt zur Kippachse i). In der Abbildung 4.31 ist dargestellt wie die *Kippdistanz* ermittelt wird. Die *Kippdistanz* Δ_i ist proportional zu der Kraft, die benötigt wird um den resultierenden

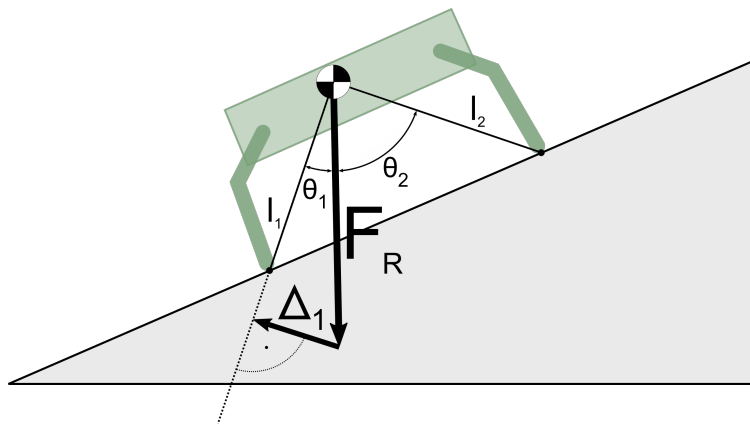


Bild 4.31.: Die *Kippdistanz* Δ der *Distance Force Stability Measure* kann geometrisch interpretiert und hergeleitet werden.

Kraftvektors F_R zum *Kippwinkel* $\theta_i = 0^\circ$ zu verschieben und hängt gleichzeitig von dem aktuellen *Kippwinkel* ab.

$$\Delta_i = \sin(\theta_i) \cdot |F_R| \quad (4.90)$$

Vorteil der *DFSM* ist die klare, geometrische Interpretation. Das Kriterium wird nicht anhand der Gewichtskraft normiert. Das Gewicht bleibt explizit als Faktor erhalten. Weiter werden die beiden Komponenten der *DFSM* nicht wie bei der *FASM* miteinander multipliziert, sondern bleiben beide als *geometrische* und *kraftbasierte Stabilität* erhalten. Somit können diese auch unabhängig voneinander analysiert werden. Wird ein Roboter in der Größe proportional skaliert, verändert sich seine *geometrische Stabilität* nach der *DFSM*

nicht. Die *kraftbasierte Stabilität* nimmt jedoch aufgrund des erhöhten Gewichts zu. Die *DFSM* wird zu jedem Zeitschritt, auch während des Laufens ermittelt und das Minimum der $DFSM_i$ bzgl. aller Kippachsen i gibt die Stabilitätsreserve des Roboters an:

$$DFSM = \min_i \left(\frac{\sin(\theta_i)}{|F_R|} \right) \quad (4.91)$$

Für statisch stabil laufende Roboter können die dynamischen Effekte vernachlässigt werden. Dann vereinfacht sich der resultierende Kraftvektor F_R zur Gewichtskraft des Roboters.

Kinematische Grundstabilität Die kinematische Grundstabilität kann dient dazu die Kinematik und Mechatronik hinsichtlich der Stabilität zu bewerten. Der Wert ist invariant und hängt von festen Kenngrößen des Roboters ab. Dynamische Effekte werden bei dieser statischen Analyse nicht betrachtet. Die Kippachsen i werden für die Ruheposition der Füße im Stand ermittelt. Ansonsten erfolgt die Berechnung analog zu der Berechnung der *Stabilität während des Laufens* - siehe Gleichung 4.91. Entscheidender Unterschied ist, dass der Wert invariant ist und eine Stabilitätseigenschaft der Kinematik sowie des Designs beschreibt. So können gut verschiedene Roboter hinsichtlich ihres inhärenten Stabilität miteinander verglichen werden.

4.5.2. Modellbasierte, normierte Geschwindigkeitsmetrik

Die Anzahl der Geschwindigkeitsmetriken in der Fachliteratur ist deutlich kleiner als die Anzahl der Stabilitäts- oder Energieeffizienz-Metriken. In der Diskussion der wenigen Geschwindigkeitsmetriken konnten zwei Metriken als potentielle Kandidaten für die Entwicklung einer roboterunabhängigen Metrik identifiziert werden. Die *Geschwindigkeit pro Körperlänge* und die *normalisierte Geschwindigkeit aus der Biologie* sind beides Metriken, die eine kinematische Normierung vornehmen und somit die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Systemen deutlich verbessern. Der Unterschied liegt vor allem darin, dass einmal die Körperlänge in Laufrichtung und einmal die Schulterhöhe zur Normierung verwendet wird. Bei beiden Größen ist die Definition der Körperlänge bzw. Schulterhöhe nicht für jeden Roboter oder jedes Lebewesen einfach zu interpretieren. Beide Metriken haben weitere Schwachstellen, die im Folgenden hergeleitet werden sollen. Die Normierung anhand der Körperlänge berücksichtigt nicht die Beinlänge, die jedoch wesentlichen Einfluss auf die Lokomotion hat. Wird von zwei gleich langen Körpern mit sehr unterschiedlichen Beinlängen ausgegangen (wie beispielhaft oben in Abb. 4.32 dargestellt), würde die *Geschwindigkeit pro Körperlänge* keine Unterscheidung der Systemen ermöglichen. Im Kontrast dazu würde die *normalisierte Geschwindigkeit aus der Biologie* diesen Unterschied deutlich erfassen. Jedoch unterscheidet diese Normierung nicht wie lang der Körper des Systems ist oder auch wie viele Beinpaare zur Lokomotion eingesetzt werden (siehe unten in Abbildung 4.32). Außerdem korreliert die Schulterhöhe bei Insekten und Reptilien nicht besonders gut mit der Bein- bzw. Schrittweite (siehe unten in Abbildung 4.32). Somit sind beide Metriken nicht dafür geeignet sehr unterschiedliche Kinematiken zu vergleichen. Aus diesem Grund wird eine neue, modellbasierte, normierte Geschwindigkeitsmetrik entwickelt, die beide Aspekte berücksichtigt.

Normalised Walking Velocity (NWW) Bei der Normalised Walking Velocity soll vor allem eine Definition verwendet werden, die eindeutig ist und keine Schwierigkeiten bei der Interpretation von bestimmten Referenzlängen wie der Körperlänge oder der Hüfthöhe erzeugt. Gleichzeitig soll eine Normierung anhand des Lokomotionsapparates stattfinden, die es erlaubt verschiedene mehrbeinige laufende Systeme

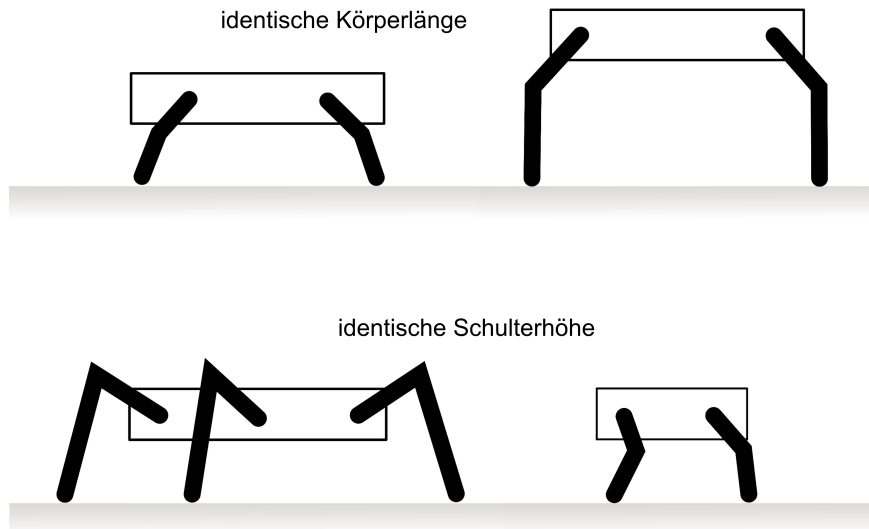


Bild 4.32.: Beispielhafte Darstellung verschiedener mehrbeiniger Laufroboter-Kinematiken zur Veranschaulichung der Normierungsprobleme bei Verwendung der Körperlänge oder der Schulterhöhe.

miteinander zu vergleichen. Das im Abschnitt 4.3 eingeführte Lokomotionsmodell mit der erweiterten Aufstandsfläche A_{ext} bildet hierfür die Basis. Die Laufgeschwindigkeit V_{NWV_x} wird anhand der maximalen X-Ausdehnung der erweiterten Aufstandsfläche $X_{A_{ext}}$ normiert.

$$V_{NWV_x} = \frac{V_{metric}}{X_{A_{ext}}}. \quad (4.92)$$

Wie im Abschnitt 4.3 beschrieben wird die Modellkenngröße $X_{A_{ext}}$ über den Schwerpunkt und die äußersten Fußpunkte P_{AEP} sowie P_{PEP} der vorderen bzw. hinteren Beinpaare bestimmt. Somit wird bei dieser Normierung die Körperlänge und die Schulterhöhe bzw. Beinlänge berücksichtigt. Jedoch fließt bei der Normierung nicht direkt die Körperlänge, sondern die Länge des Lokomotionsapparates bzw. der Abstand zwischen dem vordersten und hintersten Beinpaar ein. Auch die Schulterhöhe ist indirekt über die Punkte P_{AEP} sowie P_{PEP} bzw. die effektive Beinlänge sowie die *Schrittweite* berücksichtigt. Die *Normalised Walking Velocity* umgeht damit die nicht eindeutigen Definitionen und schafft eine klare, eindeutige Metrik. Da die *Schrittweite* bzw. die Punkte P_{AEP} sowie P_{PEP} veränderliche Größen sind, ist die normierende X-Ausdehnung der erweiterten Aufstandsfläche $X_{A_{EX}}$ ebenfalls nicht konstant. Alternativ könnte die maximale X-Ausdehnung der erweiterten Aufstandsfläche $X_{A_{ext,max}}$ der maximalen *Schrittweiten* zur Normierung verwendet werden um die Definition zu vereinfachen. Die *Normalised Walking Velocity* wird mit der Einheit [1/Sekunde] angegeben.

In der Abbildung 4.33 sind die gleichen Kinematiken wie in Abbildung 4.32 dargestellt, jedoch mit der zusätzlich eingezeichneten Größe $X_{A_{ext}}$. Unter der Annahme, dass alle vier dargestellten Systeme die gleiche metrische Laufgeschwindigkeit erreichen, wäre die *Normalised Walking Velocity* des kleinen vierbeinigen Systems unten rechts am höchsten. Beim Vergleich der oberen beiden Kinematiken, hätte das System mit den kürzeren Beinen eine höhere *Normalised Walking Velocity*. Die *Normalised Walking Velocity* normalisiert somit gut die verschiedenen Kinematiken und verbessert die Vergleichbarkeit zwischen den Systemen.

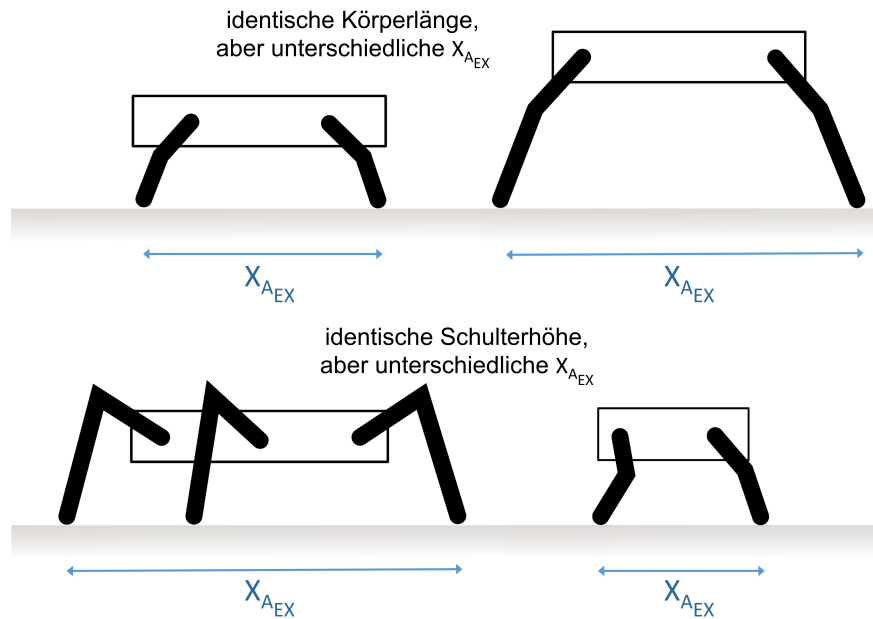


Bild 4.33.: Die neue *Normalised Walking Velocity* nutzt zur Normierung die Ausdehnung der erweiterten Aufstandsfläche X_{AEX} . So können mehrere, wichtige Aspekte des Lokomotionsapparats bei der Normierung berücksichtigt werden.

4.5.3. Modellbasierte, normierte Energieeffizienzmetrik

Zahlreiche Arbeiten befassen sich mit der energetischen Optimierung von Robotersystemen. Auch für Laufroboter ist dies ein wichtiges Thema, da die Systeme mit einer besseren Effizienz länger autonom eingesetzt werden können. In der Diskussion der vorgestellten Energiemetriken hat sich jedoch gezeigt, dass es im Wesentlichen nur die *Specific Resistance*, die *Total Cost of Transport* sowie die *Mechanical Cost of Transport* als Metriken gibt, die sich auf viele verschiedene Systeme anwenden lassen. Im Grunde sind alle drei Metriken nahezu identisch: die verbrauchte Energie wird anhand einer zurückgelegten Strecke und dem Gewicht des Roboters normiert (siehe Gleichung 4.55). Alternativ wird mit der aktuellen Leistung sowie der Laufgeschwindigkeit gearbeitet statt der integrierten Energie und Strecke. Die Metriken unterscheiden sich vor allem in der Wahl der Energie, die für die jeweilige Metrik zum Vergleich betrachtet wird. Die *Specific Resistance* macht keine eindeutigen Angaben, welche Energie verwendet werden sollte. Die *Total Cost of Transport* sowie die *Mechanical Cost of Transport* geben an, dass sämtliche vom Roboter verbrauchte Energie verwendet werden soll bzw. nur die mechanische Energie für die Lokomotion. Problematisch ist außerdem die Annahme einer konstanten Geschwindigkeit, die in der Regel nicht vorliegt. Für die zu verwendende Strecke werden keine Angaben gemacht. Wird die Strecke jedoch sehr kurz gewählt, kann es sein, dass die Beschleunigungen während eines Schrittes einen starken Einfluss auf die Metrik haben. Im Extremfall wird eine Distanz gewählt, die kleiner als eine Schrittweite ist. Dann wird ein beliebiger Ausschnitt der Effizienz während eines Schrittes betrachtet. Die bisherigen Metriken müssen so angepasst und erweitert werden, dass sie die Eigenschaften von Laufrobotern besser berücksichtigen.

Cost per Step (CpS) Die *Cost per Step* Metrik verändert die Metriken im Wesentlichen in zwei Aspekten. Zum einen wird immer die verbrauchte Energie pro Schritt betrachtet. Damit wird die Distanz zur Normierung auf eine *Schrittweite* festgelegt. Die *Schrittweite* S ist veränderlich und somit kann sich für verschiedene Geschwindigkeiten und Laufmuster eine unterschiedliche Normierungsbasis ergeben. Weiter

wird die zu verwendende Energie eindeutig definiert. Die *Cost per Step* verwendet die gesamte verbrauchte Energie E_{input} während eines Schrittes, bereinigt um die Ruheenergie im Stand $E_{standing}$.

$$CpS = \frac{E_{input} - E_{standing}}{m_{robot} \cdot g \cdot S} \quad (4.93)$$

Beide Werte lassen sich einfach und messtechnisch eindeutig erfassen. Die *CpS* wird mit der Masse des Roboters m_{robot} und Fallbeschleunigung g sowie der Schrittweite S im Nenner normiert. Weiter konzentriert sich die *Cost per Step* damit auf die Lokomotion. Unterschiede, ob ein Roboter seine Steuerungselektronik, Recheneinheiten und Sensoren on-board hat oder nicht, werden damit bewusst nicht berücksichtigt. Im Gegensatz zu der *Mechanical Cost of Transport* wird jedoch durch diese Messvorschrift die Effizienz der Aktuatoren berücksichtigt. Die Ruheenergie $E_{standing}$ im Stand lässt sich empirisch ermitteln, indem der Roboter vor den Laufexperimenten fix auf einer Position steht und die aktuelle Leistungsaufnahme des Gesamtsystems $P_{standing}$ ermittelt wird. Wird diese mit der Zeit T_{step} multipliziert, die pro Schritt benötigt wird, ergibt sich die *CpS* zu:

$$CpS = \frac{E_{input} - (P_{standing} \cdot T_{step})}{m_{robot} \cdot g \cdot S} \quad (4.94)$$

Die *Cost per Step* ist eine einheitenlose, klar definierte Metrik speziell für Laufroboter, die nicht von der Laufgeschwindigkeit abhängt. Die *Cost per Step* Metrik sollte für eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Robotersystemen unter ähnlichen, kontrollierten Umgebungsbedingungen ermittelt werden. Es sollten keine externen Kräfte auf das System wirken wie z.B. Wind. Außerdem sollte der Untergrund entlang der Laufstrecke die gleiche Oberflächenbeschaffenheit aufweisen und möglichst wenig Schlupf beim Laufen verursachen. Weiter sollte der Untergrund keine Steigung oder Hindernisse für vergleichbare *Cost per Step* Werte aufweisen. Die Normierung anhand der *Schrittweite* sorgt dafür, dass die *Cost per Step* kontinuierlich während des Laufens betrachtet werden muss. Damit kann die Metrik nicht nur zum Vergleich verschiedener Robotersysteme verwendet werden, sondern erlaubt es auch die Lokomotion kontinuierlich zu bewerten. So kann z.B. ermittelt werden, wie effizient das Laufen über schwierige Hindernisse ist und ggf. die Laufstrategie angepasst werden. Im Allgemeinen unterscheiden sich Laufroboter stark hinsichtlich der jeweils eingesetzten Steuerungselektronik. Viele kleinere oder sehr leichte Roboter verwenden einen leistungsstarken, externen Controller oder Rechner. Andere Systeme sind vollkommen autonom bzw. autark und tragen sämtliche Elektronik mit sich. Das Design der Kinematik wie z.B. die Anordnung und Stellung der Beine hat großen Einfluss wie die Gravitationskräfte auf das System wirken. Diese und weitere Aspekte können in der *Cost per Step* durch die Bereinigung um die Ruheenergie nicht erfasst werden. Aus diesem Grund wurde eine zweite Energieeffizienzmetrik entwickelt, die diese Aspekte erfasst.

System Modesty Die *System Modesty* beschreibt die inhärente Energieeffizienz des Gesamtsystems. Dies beinhaltet sämtliche zur Steuerung des Roboters notwendige Elektronik, die Aktuatoren und Sensoren. Außerdem kann ermittelt werden wie effizient die Kinematik konzipiert wurde und ob bereits ein hoher Energieverbrauch für das Stehen notwendig ist. Die *System Modesty* berechnet sich angelehnt an die *Cost per Step* wie folgt:

$$SysM = \frac{P_{input}}{m_{robot} \cdot g \cdot h_{standing}} \quad (4.95)$$

Dabei sollte für die Normierung die mittlere Standhöhe $h_{standing}$, bei der der Roboter läuft, sowie die Masse des Roboters m_{robot} und Fallbeschleunigung g verwendet werden. Die *System Modesty* gibt keinen Einblick

in die Leistungsfähigkeit der Lokomotion. Jedoch kann sie ein sehr hilfreiches Maß für die Entwicklung neuer Roboter sein. Sie kann verdeutlichen, dass andere Roboter effizientere Komponenten einsetzen und insgesamt die Optimierung der Gesamteffizienz unterstützen. Die *System Modesty* ist nicht einheitenlos, sondern wird in der Einheit $1/\text{Sekunde}$ angegeben. Die *System Modesty* lässt sich als normierte Leistungsaufnahme im Stand integrieren. Zur Normierung wird die potentielle Energie $E_{pot} = m_{robot} \cdot g \cdot h_{standing}$ verwendet. Die Normierung einer Leistung mit einer Energie erklärt auch anschaulich die Einheit $1/\text{Sekunde}$.

4.6. Zusammenfassung und Diskussion modellbasierter Metriken

In diesem Abschnitt sollen die neu entwickelten, modellbasierten Metriken nochmals kurz zusammengefasst und kritisch diskutiert werden. Die drei Metriken werden unabhängig voneinander hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile beschrieben.

Distance Force Stability Measure (DFSM) Die *DFSM* ist eine neue, modellbasierte Stabilitätsmetrik, die die *Force Angle Stability Margin (FASM)* weiterentwickelt. Im Gegensatz zur *FASM* werden die zwei Stabilitätskomponenten in der Gleichung nicht miteinander multipliziert, sondern bleiben unabhängig erhalten. Der *Kippwinkel* der *FASM* wird über die Sinusfunktion auf den Wertebereich $[0;1]$ normiert. Der resultierende Kraftvektor F_R wird nicht anhand der Gewichtskraft normiert, sondern wird, wie bei der ursprünglichen *FASM*, betragsmäßig betrachtet. Damit ist die *DFSM* nicht schwieriger oder umfangreicher in der Berechnung als die *FASM*. Jedoch bietet die unabhängige Betrachtung der *geometrischen Stabilität* $\sin(\theta_i)$ und der *kraftbasierten Stabilität* $|F_R|$ große Vorteile. Die *geometrische Stabilität* ist skalierungsinvariant und eine qualitative Systemgröße. Der Wert eignet sich hervorragend um verschiedene Robotersysteme hinsichtlich ihrer inhärenten, *geometrischen Stabilität* zu vergleichen. Diese *geometrische Stabilität* hängt stark von der Kinematik ab, aber auch die aktuelle Position der Füße, die Neigung des Zentralkörpers sowie die Höhe des Zentralkörpers (Schwerpunkts) ab. Die *geometrische Stabilität* ist vollkommen unabhängig vom Gewicht des Systems. Durch die Verwendung der Sinusfunktion zur Normierung entstehen zwei Vorteile. Zum einen erhält der Anwender einen besser zu interpretierenden Zahlenwert zwischen $[0;1]$. Zum anderen kann die Sinusfunktion auch dazu verwendet werden den benötigten Anteil einer Stellkraft (Kippdistanz) relativ zur Gewichtskraft zu bestimmen (siehe Abbildung 4.31). Damit entsteht eine einfache, nachvollziehbare Interpretation ähnlich der *Static Stability Margin (SSM)*. Die zweite Komponente der *DFSM* hängt vom Gewicht ab und erlaubt die quantitative Abschätzung von zulässigen Störkräften. Ein schwereres System ist toleranter gegenüber externen Störungen und besitzt nach der *DFSM* eine höhere *kraftbasierte Stabilität*. Dieser Anteil der *DFSM* kann somit verwendet werden um die Stabilität zu quantifizieren. Ein kleiner Nachteil der *DFSM* ist, dass zwei Werte benötigt werden um die Stabilität eines Roboters zu beschreiben. Die *DFSM* ist jedoch durch diese leicht erhöhte Komplexität in der Lage eine relative, *geometrische Stabilität* sowie eine absolute, *kraftbasierte Stabilität* zu definieren. Gleichzeitig ist sie eindeutig definiert und geometrisch anschaulich nachvollziehbar.

Normalised Walking Velocity (NWW) Die *NWW* berücksichtigt mehrere kinematische Eigenschaften eines Systems und ist durch den modellbasierten Ansatz in der Lage gut zwischen verschiedenen Robotern zu abstrahieren. Die normale, metrische Geschwindigkeit wird mit der Ausdehnung der erweiterten Aufstandsfläche in Laufrichtung normiert. Die erweiterte Aufstandsfläche berücksichtigt sowohl die effektive Beinlänge sowie die Länge des Lokomotionsapparates. Die Berechnung der *NWW* ist effizient und einfach

anzuwenden. Durch die *NWV* werden bei gleicher Geschwindigkeit kleine Roboter mit kurzen Beinen gegenüber großen Robotern mit langen Beinen besser bewertet. Ein scheinbarer Nachteil der *NWV* ist, dass sich die Normierungsbasis während der Lokomotion verändern kann, da die erweiterte Aufstandsfläche von der aktuellen *Schrittweite* abhängt. Effektiv werden durch die Definition der *NWV* hohe Schrittfrequenzen gegenüber großen *Schrittweiten* bevorzugt. Da jedoch die Ausdehnung der erweiterten Aufstandsfläche neben der *Schrittweite* auch die kinematische Anordnung der Beine berücksichtigt, ist es nicht möglich durch kleine *Schrittweiten* eine hohe *NWV* zu erreichen. Die *Normalised Walking Velocity* stellt eine wesentliche Verbesserung gegenüber bisherigen Normierungen dar, da sie eindeutig definiert ist und gleichzeitig alle wesentlichen kinematischen Aspekte abstrahiert.

Cost per Step (CpS) und System Modesty (SM) Die *CpS* basiert auf dem Konzept der *Cost of Transport (CoT)* bzw. der *Specific Resistance (SR)*. Allerdings verwendet sie als Basis die integrierte Form dieser Gleichungen und ist somit unabhängig von der Messung einer aktuellen Laufgeschwindigkeit. Folglich entstehen bei der *CpS* keine Schwankungen oder Abweichung durch die typischerweise nicht konstanten Laufgeschwindigkeiten. Die *CpS* verwendet zur Normierung nicht wie die *CoT* oder *SR* eine frei wählbare Distanz, sondern legt die Normierungsdistanz auf genau eine *Schrittweite* fest. Ungenauigkeiten durch unterschiedlichen Schritt-Diskretisierungen in der Messdistanz entfallen. Bei den bisherigen Metriken war die betrachtete Energie oft nicht eindeutig definiert. Die *CpS* nutzt eindeutig nur die verbrauchte Gesamtenergie des Roboters. Diese kann einfach und eindeutig z.B. mit einem externen Messgerät bestimmt werden. Um jedoch eine Aussagekraft hinsichtlich der Lokomotionseffizienz zu bekommen, wird die *CpS* noch mit Hilfe der Leistung im Stand normiert. Die *CpS* ist eine dynamische Metrik, die für jeden Schritt bestimmt wird. Dies ist zunächst ein kleiner Nachteil, da beim Vergleich verschiedener Systeme Kurvenverläufe und nicht mehr Einzelwerte verglichen werden müssen. Jedoch bietet dieser Ansatz auch enorme Vorteile. Die *CpS* kann verwendet werden um während der Lokomotion die Effizienz zu bewerten und diesen online z.B. in schwierigem Gelände über die Lokomotionsparameter anzupassen. Die *CpS* wird um eine zweite Metrik, die *System Modesty (SM)*, ergänzt. Diese neue Metrik berücksichtigt, ob der Roboter im Stand viel Energie verbraucht, um das eigene Gewicht zu tragen. Die *SM* betrachtet vor allem die Effizienz der Kinematik und Mechatronik. Die *SM* ist ein statischer Wert, der gut geeignet ist verschiedene Robotersysteme zu vergleichen. In der Kombination sind die beiden Metriken in der Lage zuverlässig und präzise die Energieeffizienz von mehrbeinigen Robotern zu bestimmen. Außerdem bietet die kontinuierliche, dynamische Berechnung der *CpS* neue Ansätze um die Anpassungsfähigkeit und Autonomie von Laufrobotern weiter zu steigern.

Dies trägt außerdem zu einer klareren, eindeutigen Definition bei.

5. Analyse der mehrbeinigen Lokomotion

Für die zielgerichtete Optimierung von Laufrobotern sind systematische, systemunabhängige Analysen notwendig. In diesem Kapitel werden im Rahmen der Arbeit entwickelte Analysemethoden und Konzepte vorgestellt. Die Verfahren lassen sich in drei Kategorien einteilen. Die empirischen Analysen erfassen aktuelle Messdaten und nehmen eine erste Vorverarbeitung und Interpretation vor. Die kinematischen Analysen

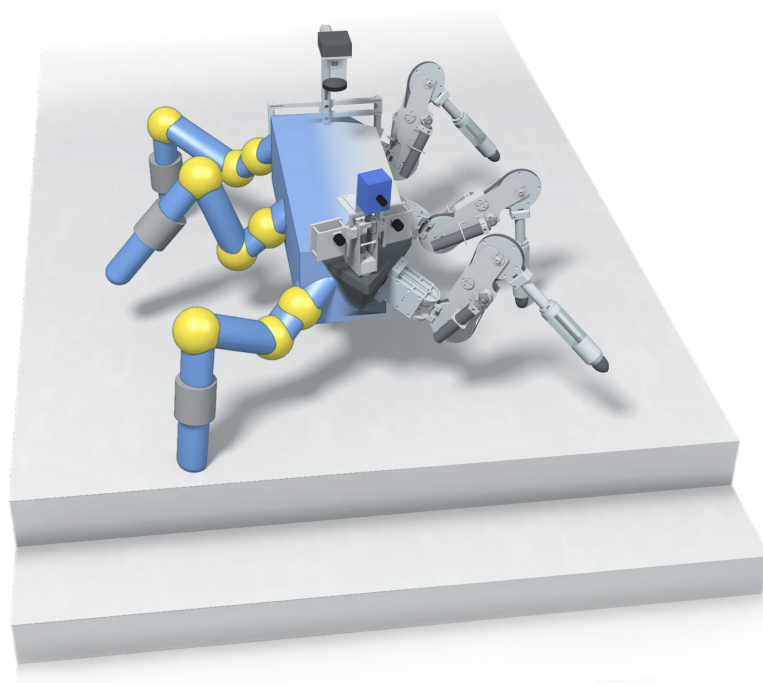


Bild 5.1.: Dynamische Simulationsumgebungen sind wichtige Werkzeuge für die Analyse von komplexen Laufrobotern wie LAURON. Quelle [Sut12]

können verwendet werden um die Fähigkeiten eines Roboters zu bewerten, auch bevor dieser vollständig konstruiert oder aufgebaut wurde. Die dynamischen Analysewerkzeuge stellen wichtige Komponenten zur Verfügung um auch schwierige, dynamische Situationen mit einem Laufroboter untersuchen zu können. Die vorgestellten Analysemethoden und Werkzeuge wurden vor allem während der Arbeit mit den Laufrobotern *LAURON IVc* und *LAURON V* entwickelt.

5.1. Empirische Analysen

Für die Analyse mehrbeiniger Lokomotionsvorgänge ist es wichtig Daten während des Laufvorgangs erfassen und interpretieren zu können. Insbesondere die Optimierung der Lokomotionsparameter bestehender Laufroboter ist ein wichtiger Aspekt dieser Arbeit, der nur mit umfangreichen, realen Daten umsetzbar ist. Manche dieser Messdaten sind einfach und exakt zu erfassen, andere müssen aus Messdaten extrahiert oder

abgeleitet werden. Im Folgenden werden die Methoden zu Erfassung der wichtigsten Messdaten, die auch für die Anwendung der entwickelten modellbasierten Metriken benötigt werden, zusammengestellt.

5.1.1. Fußpunkte: AEP und PEP

Jeder Roboter verfügt über Sensoren, die die Gelenkwinkelstellungen ermitteln können. Unabhängig davon, ob es lineare oder rotatorische Gelenke sind, liegen diese Daten meist mit einer hohen Abstrakte vor. Die Umrechnung bzw. Transformation der Gelenkwinkel in Koordinaten der Fußspitzen erfolgt mittels *direkter Kinematik*. Hierfür wird auch bei Laufrobotern, wie in der Robotik üblich, die *Denavit-Hartenberg-Transformation* verwendet. Details zu dieser Koordinatentransformation können der Standard Literatur wie z.B. dem *Springer Handbook of Robotics*[203] entnommen werden. Während des Laufens durchläuft jedes Bein eine Schwing- und eine Stemmphase. In der Abbildung 5.2 ist die Schwingphase blau und die Stemmphase grün für eine beispielhafte Trajektorie des Laufroboters *LAURON IVc* dargestellt. Für eine

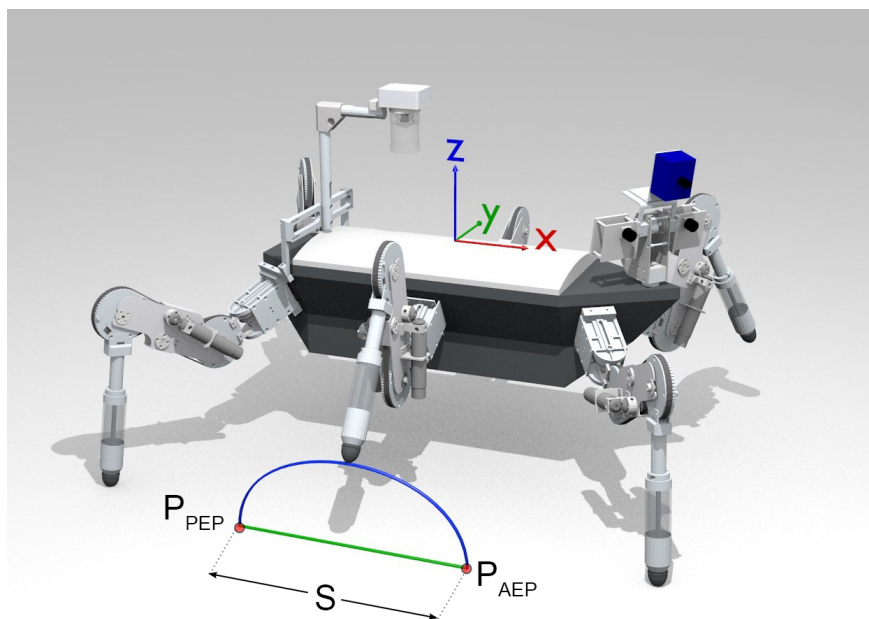


Bild 5.2.: Swing- und Stemmtrajektorie des Laufroboters *LAURON IVc* mit eingezeichnetem P_{AEP} und P_{PEP} . Quelle (modifiziert) [Hep11]

roboterunabhängige Bewertung der Lokomotionsleistung muss von der Trajektorie abstrahiert werden. Deswegen konzentrieren sich die weiteren Untersuchungen vor allem auf die beiden Punkte $P_{AEP}(x,y,z)$ und $P_{PEP}(x,y,z)$. Diese Punkte werden im lokalen Roboter-Koordinatensystem erfasst. Der erste und jeweils letzte Punkt, bei dem das Bein Bodenkontakt hatte, muss aufgezeichnet werden. Oft lassen sich der $P_{AEP}(x,y,z)$ und $P_{PEP}(x,y,z)$ auch direkt aus der Robotersteuerung als Zielpunkte extrahieren, da viele Systeme mit diesen Punkten arbeiten um die Beinbewegungen zu koordinieren. Alternativ kann mit einem externen Tracking System die Fußspitze in kartesischen Weltkoordinaten bestimmt werden. Dann müssen die Messdaten noch in das Koordinatensystem des Roboters transformiert werden. Der $P_{AEP}(x,y,z)$ und $P_{PEP}(x,y,z)$ sind wichtige Kenngrößen des entwickelten Lokomotionsmodells.

5.1.2. Energieverbrauch bzw. Leistungsaufnahme

Der Energieverbrauch eines Roboters ist eine empirische Messgröße, die stark von dessen Größe und Antriebstechnik abhängt. Der Energieverbrauch kann gut verwendet werden um einen Laufroboter zu charakterisieren. Dabei macht es keinen Unterschied, ob die aktuelle Leistung P oder die zeitlich integrierte Energie E betrachtet wird. Die entwickelte Energieeffizienzmetrik *Cost per Step (CpS)* benötigt Daten über die aktuelle Leistungsaufnahme bzw. die verbrauchte Energie in einer definierten Zeitspanne. Wie bereits im Kapitel 4 ausführlich diskutiert, reicht die mechanische Ausgangsleistung der Antriebe nicht aus um den Energieverbrauch bei der Lokomotion zu ermitteln. Es ist wichtig den gesamten Energieverbrauch inklusive aller Elektronik und Sensorik zu erfassen.

$$E_{input} = \int^T U_{input}(t) \cdot I_{input}(t) dt \quad (5.1)$$

Am besten kann die Energie bzw. der verbrauchte Strom entweder direkt an den Akkumulatoren oder der externen Spannungsquelle z.B. über einen Referenzwiderstand gemessen werden. Für detaillierte Analysen kann es von Vorteil sein den Energieverbrauch pro Motor und für die elektronischen Komponenten unabhängig voneinander zu ermitteln. Dann ergibt sich die Gesamtenergie z.B. für i Motoren mit der Motorspannung $U_{motor_i}(t)$ und den Motorströmen $I_{motor_i}(t)$ zu:

$$E_{input} = \int^T \sum_i (U_{motor_i}(t) \cdot I_{motor_i}(t)) + U_{electronics}(t) \cdot I_{electronics}(t) dt \quad (5.2)$$

Wobei der hintere Teil der Gleichung 5.2 für die elektronischen Komponenten mit der Spannung $U_{electronics}(t)$ sowie dem Strom $I_{electronics}(t)$ meist durch einen konstanten Term abgeschätzt werden kann, da diese Werte sich nur geringfügig mit der Zeit verändern. Die kontinuierliche Integration einer ungenau gemessenen Leistung akkumuliert schnell große Fehler auf. Referenzmessungen sollten eingesetzt werden um die interne Messtechnik zu validieren oder zu kalibrieren. Für die Laufroboter *LAURON IVc* und *LAURON V* wurde auf dem UCoM eine integrierte Motorstrommessung entwickelt[177] (siehe Abbildung 5.3). Die Messung erfolgt über einen speziellen Messwiderstand. Referenzmessungen haben gezeigt, dass die gemessenen Stromwerte erhebliche Abweichungen aufweisen. Durch ein nichtlineares Fitting konnte die Messqualität jedoch deutlich verbessert werden. Der Verbrauch der elektronischen Komponenten konnte anhand von externen Referenzmessungen mit konstanten Werte angenähert werden.

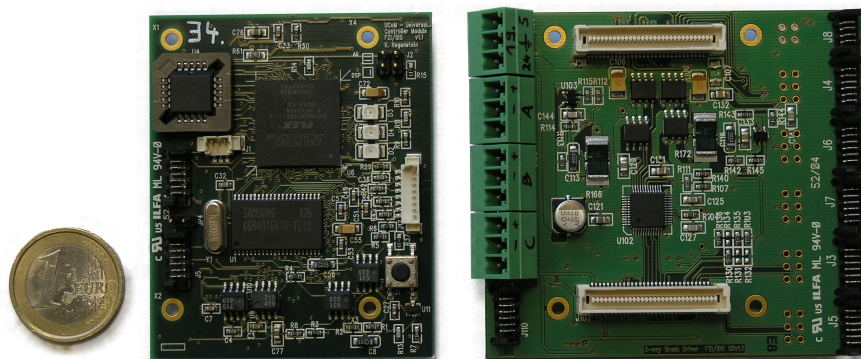


Bild 5.3.: Die interne Motorstrommessung des UCoM, Universal Controller Module, konnte durch eine nichtlineare Fitting-Funktion deutlich verbessert werden.

5.1.3. Schwerpunkt

Der Schwerpunkt des Laufroboters muss für die entwickelte Stabilitätsmetrik exakt bestimmt werden. Im Gegensatz zu starren, monolithischen Objekten verändert sich der Schwerpunkt des Roboters $CoM_r(x,y,z)$ kontinuierlich. Seine exakte Position hängt von dem Gewicht jedes beweglichen Segments sowie dessen Position relativ zum geometrischen Mittelpunkt des Roboters ab. In vielen Arbeiten werden die Beine als masselos angenommen. Bei vielen aktuellen Laufrobotern wie z.B. ANYmal oder LAURON V können die Beine aber keinesfalls als masselos angenommen werden (siehe Abschnitt A.2). In einem solchen Fall muss ein Dynamik-Modell des Roboters erstellt werden. Eine effektive Möglichkeit das dynamische Modell herzustellen ist es die wesentlichen Elemente durch geometrische Grundkörper zu approximieren (siehe Abbildung 5.4). Jeder der Grundkörper besitzt eine Masse $m_{segment}$ und einen Schwerpunkt $CoM_{segment}(x,y,z)$. Die

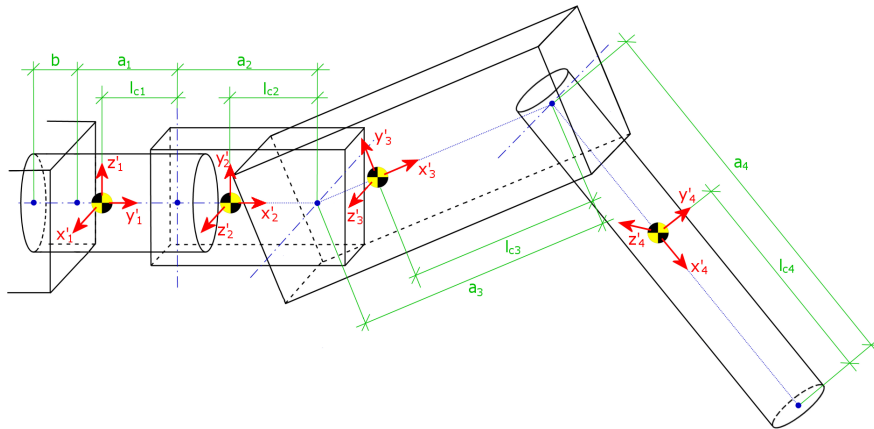


Bild 5.4.: Approximation des dynamischen Modells durch Zerlegung in geometrische Grundkörper und deren Schwerpunkte. Quelle [Kon10]

Massen können entweder über eine Waage bestimmt oder aus CAD-Daten mit Angaben der Materialdichten ermittelt werden. Auch die Position des Schwerpunkts innerhalb jedes Grundkörpers bzw. Segments lässt sich aus CAD Daten extrahieren.

Auf Basis der aktuellen Gelenkwinkel kann mit Hilfe der direkten Kinematik die aktuelle Position der Segmentschwerpunkte $CoM_{segment}(x,y,z)$ berechnet werden. Mit der folgenden Gleichung kann so der Schwerpunkt jedes Beines CoM_i erfasst werden [Roennau et al., 2014d]:

$$CoM_i = \sum_i \frac{CoM_{segment}(x,y,z) \cdot m_{segment_i}}{m_i} \quad (5.3)$$

Dabei ist m_i die Masse eines Beines, die sich aus der Summe aller Beinsegmentmassen $m_{segment_i}$ zusammensetzt:

$$m_i = \sum_i m_{segment_i} \quad (5.4)$$

Die beweglichen Beinschwerpunkte ergeben dann zusammen mit dem Schwerpunkt des Zentralkörpers als gewichtete Summe den Schwerpunkt des Roboters CoM_r (siehe Gleichung 4.81). In der Abbildung 4.24 im Abschnitt 4.3 ist der letzte Schritt der Berechnung anschaulich dargestellt. Der Modellierungsaufwand für die Segmentschwerpunkte und Segmentmassen fällt nur einmalig an. Im Betrieb sind die Gelenkwinkel des Roboters stets einfach verfügbar, so dass die kontinuierliche, präzise Bestimmung des Schwerpunktes mit vertretbarem Rechenaufwand möglich ist.

5.1.4. Laufgeschwindigkeit

Die Laufgeschwindigkeit eines Roboters exakt zu erfassen ist nicht einfach, da sich Laufbewegungen aus vielen Teilbewegungen zusammensetzen. Als Ausgangspunkt für die Geschwindigkeit können die *Schrittweite* S , die *Zykluszeit* T und der *Dutyfactor* β dienen (siehe Grundlagen in Abschnitt 2.4). Theoretisch bewegt sich der Roboter nur in Laufrichtung vorwärts, wenn die Beine ihn während der Stemmphase nach vorne schieben. Damit ergibt sich die rechnerische Laufgeschwindigkeit nach [156] zu:

$$V_{walk} = \frac{S}{\beta \cdot T} \quad (5.5)$$

Diese sehr einfache Modellierung approximiert nur für das statische Laufen ohne Flugphasen einen sinnvollen Geschwindigkeitswert. Außerdem wird keinerlei Schlupf der Füße mit dem Untergrund berücksichtigt. Zur einfachen, groben Abschätzung der Laufgeschwindigkeit ist die Gleichung gut, um jedoch wissenschaftliche Analysen durchzuführen, muss die Geschwindigkeit über ein modernes Motion Tracking System (siehe z.B. [46][170]) oder über andere, externe Messtechnik bestimmt werden. Mit einem typischen 2D-



Bild 5.5.: Einsatz eines 2D-Linienscanners zur Erfassung der Position des Laufroboters. Aus der präzisen Positionsmessung kann anschließend die Laufgeschwindigkeit ermittelt werden. Quelle [Hep11]

Linienscanner kann die Laufgeschwindigkeit bereits zuverlässig erfasst werden. In der Abbildung 5.5 ist zu erkennen, wie in einem solchen Setup hochwertige Messdaten erzeugt werden können. Sowohl mit Motion Tracking Systemen wie auch mit anderer Messtechnik wird nur die Position des Zentralkörpers ermittelt. Um hieraus eine effektive Laufgeschwindigkeit zu bekommen, müssen die Daten zeitlich differenziert werden.

5.1.5. Externe und interne Kräfte

Zur Analyse einer dynamischen Lokomotion ist es notwendig die auftretenden Kräfte und Momente exakt zu erfassen. Alle dynamischen Stabilitätsmetriken benötigen diese Informationen um einen korrekten Stabilitätswert ermitteln zu können. Die wichtigsten bzw. größten Kräfte sind die externen Kräfte: Schwerkraft, Störkräfte und Manipulationskräfte. Zusammen ergeben sie die resultierende Kraft F_R . Die Drehmomente, die auf den Zentralkörper wirken, spielen bei den Laufbewegungen oft eine untergeordnete Rolle. Zudem können Sie in entsprechende, äquivalente Kräfte umgerechnet werden. Aus diesem Grund werden in diesem

Abschnitt vor allem Kräfte betrachtet und der Einfluss der Momente nicht näher untersucht. Bei der Schwerkraft F_G muss zu jedem Zeitpunkt bekannt sein, wo der Schwerpunkt des Roboters liegt (siehe weiter oben). Weiter muss das aktuelle Gewicht, aber vor allem auch die Richtung der Schwerkraft ermittelt werden. Diese kann messtechnisch einfach mit einem 3D-Beschleunigungssensor erfasst werden. Externe Störkräfte F_E können z.B. durch Wind oder Steinschläge erfolgen. Auch kann ein Mensch oder anderer Roboter auf das

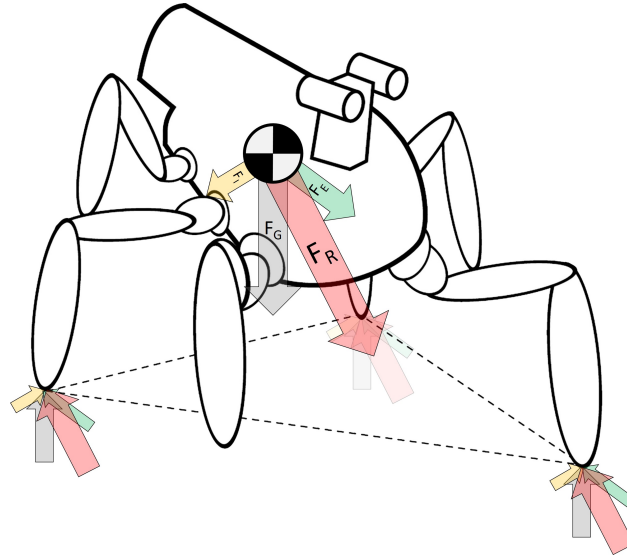


Bild 5.6.: Die externen und internen Kräfte, die auf den Laufroboter wirken können durch die Bodenreaktionskräfte mit Kraftsensoren in den Füßen erfasst werden.

System einwirken und eine störende Kraft aufbringen. Es ist schwierig diese Kräfte zu ermitteln, wenn der Kontaktpunkt unbekannt ist. Die Störkräfte können über die kombinierte Auswertung aller Kraftsensoren in den Füßen berechnet werden, da diese alle auf das System einwirkende Kräfte inklusive der Störkräfte erfassen. Über das bekannte, dynamische Modell kann der Anteil der Schwerkraft rückgerechnet und die resultierenden Störkräfte ermittelt werden. Alternativ kann über Drehmoment-Sensoren in den Gelenken erfasst werden, dass eine externe Störkraft auf das System einwirkt. Auch hierfür ist ein gutes Dynamik-Modell notwendig, da die regulären Drehmomente in den Gelenken, die beim Laufen auftreten, zuvor bekannt sein müssen. Falls der Laufroboter über einen Manipulator verfügt wie z.B. der aktuelle *Spot* Roboter von Boston Dynamics oder *LAURON V* (siehe Abschnitt A.2), spielen externe Manipulationskräfte eine wichtige Rolle. Diese können entweder über einen dedizierten Sensor am Manipulator (Kraftmessdose) oder wie bei den externen Störkräften über Drehmomentsensoren erfasst werden. Die internen Kräfte F_i entstehen durch die positiven und negativen Beschleunigungen der Beinsegmente beim Laufen. Diese inertialen Kräfte können bei hohen Laufgeschwindigkeiten wichtig für die Stabilitätsmetrik werden und dürfen nicht pauschal vernachlässigt werden. In der Abbildung 5.6 ist dargestellt wie jede Kraft, die auf den Roboter einwirkt eine Gegenkraft in den Füßen erzeugt. Insgesamt ist das Erfassen der Kräfte eine der schwierigsten und teuersten empirischen Analysen. Die Daten werden jedoch von der modellbasierte Stabilitätsmetrik *Distance Force Stability Measure (DFSM)* dringend benötigt.

5.2. Kinematische Analysen

Viele Eigenschaften eines Laufroboters lassen sich aus der Kinematik ableiten, unabhängig von der Aktuatorik oder auch der detaillierten technischen Konstruktion. Somit sind kinematische Analysen eine wichtige

Methode zur Bewertung von mehrbeinigen Laufrobotern. Insbesondere für die Entwicklung neuer, leistungsstarker Roboter sind diese Analysen essentiell. In der Natur übernehmen die vorderen, mittleren und hinteren Beinpaare unterschiedliche Aufgaben. Die vorderen bzw. vorderen und mittleren Beine tragen vor allem das Gewicht des Körpers und die hinteren Beine erzeugen die Vortriebskraft für die Lokomotion. So überrascht es nicht, dass die Beine bei Säugetieren, Reptilien, aber auch Insekten durch diese Funktionstrennung auch kinematisch unterschiedlich aufgebaut sind. In der Robotik werden jedoch nahezu ausschließlich identische Beinkinematik innerhalb eines Systems verwendet. Identische Beine können einfacher sowie kostengünstiger hergestellt und gewartet werden. Identische Beine zu haben widerspricht eigentlich den Erkenntnissen aus der Natur und sollte für zukünftige Laufroboter-Generationen in Frage gestellt werden. In diesem Abschnitt werden Methoden zur systematischen Arbeitsraumanalyse sowie Werkzeuge zur Erstellung interaktiver, adaptiver Bewegungstrajektorien vorgestellt.

5.2.1. Erreichbarkeits- und Arbeitsraumanalysen

Wenn man sich die Anzahl der Beine sowie die Anzahl der Gelenke pro Bein ansieht, variiert diese sehr stark zwischen den verschiedenen Robotersystemen. Ein Roboterbein besitzt zwischen 1- und bis zu 7-Gelenke. Die meisten mehrbeinigen Laufroboter besitzen 2 bis 4 Gelenke pro Bein. Anhand des kinematischen Modells, welches die Gelenkanordnung sowie die Segmentlängen zwischen den Gelenken beinhaltet, kann ermittelt werden wie groß der erreichbare Arbeitsraum ist [Roennau et al., 2013a][Koc10]. Weitere Details zur Modellierung der Kinematik nach *Denavit-Hartenberg* kann dem *Springer Handbook of Robotics* entnommen werden [203]. Die Größe des maximalen Arbeitsraumes ist entscheidend, wenn es darum geht die maximal möglichen *Schrittweiten* und *Schritthöhen* zu ermitteln. Daraus lassen sich auch die maximale Laufgeschwindigkeit ableiten und Fähigkeiten erkennen wie z.B. das Überwinden von Hindernissen, Treppen oder Steigungen. Eine effiziente Methode zur Analyse des kinematischen Arbeitsraumes ist die Abtastung der erreichbaren Punkte im kartesischen Raum durch eine äquidistante Abtastung der n Gelenke im Gelenkwinkelraum $(\omega_1, \dots, \omega_n)$. Für jede abgetastete Gelenkwinkelkonfiguration muss dabei die kartesische Position der Fußspitze mittels direkter Kinematik $P_i = F_{kin}(\omega_1, \dots, \omega_n)$ berechnet werden. Je nach Größe der Winkelinkremente (Auflösung der Abtastung im Gelenkwinkelraum), dem untersuchten Winkelbereich der Gelenke sowie der Anzahl der Gelenke entstehen leicht große Datenmenge mit mehr als 100 Millionen Punkten im kartesischen Raum. Diese Punkte können in verschiedenen Datenstrukturen weiterverarbeitet und analysiert werden. Eine Option ist es direkt mit den hochaufgelösten Punktwolken zu arbeiten. Alternativ kann eine volumenbasierte Voxel-Darstellung mit speichereffizienter Octree-Implementierung verwendet werden. Oder es wird versucht die Oberflächen des Arbeitsraumes durch Polynome analytisch anzunähern.

In der Abbildung 5.7 sind links die Arbeitsraumoberflächen des *LAURON IVc* Beines und rechts die des *LAURON V* Beines als Polynome dargestellt [Koc10]. Die X-, Y-Achsen sind hier in einem Beinkoordinatensystem und damit anders orientiert als sonst in dieser Arbeit (sonst definiert die X-Achse, wie in der Abbildung 5.2 gezeigt, die bevorzugte Laufrichtung des Roboters). In blau ist zum besserem Verständnis jeweils die Kinematik des Roboterbeines angedeutet. Da es sehr schwer ist die Darstellung des Arbeitsraumes in 3D mit allen Details der z.T. komplexen Oberflächen zu verstehen, wurden in dieser Arbeit Schnitte durch den Arbeitsraum gelegt und analysiert. Diese können deutlich besser untersucht und später systematisch für Optimierungen verwendet werden. Anhand der Schnitte durch den Arbeitsraum kann auch die resultierende 2D-Arbeitsfläche der Beine auf einer bestimmten Höhe direkt nachvollzogen werden. So können virtuelle Ebenen durch den Arbeitsraum gelegt werden um z.B. zu untersuchen wie das Bein an einem

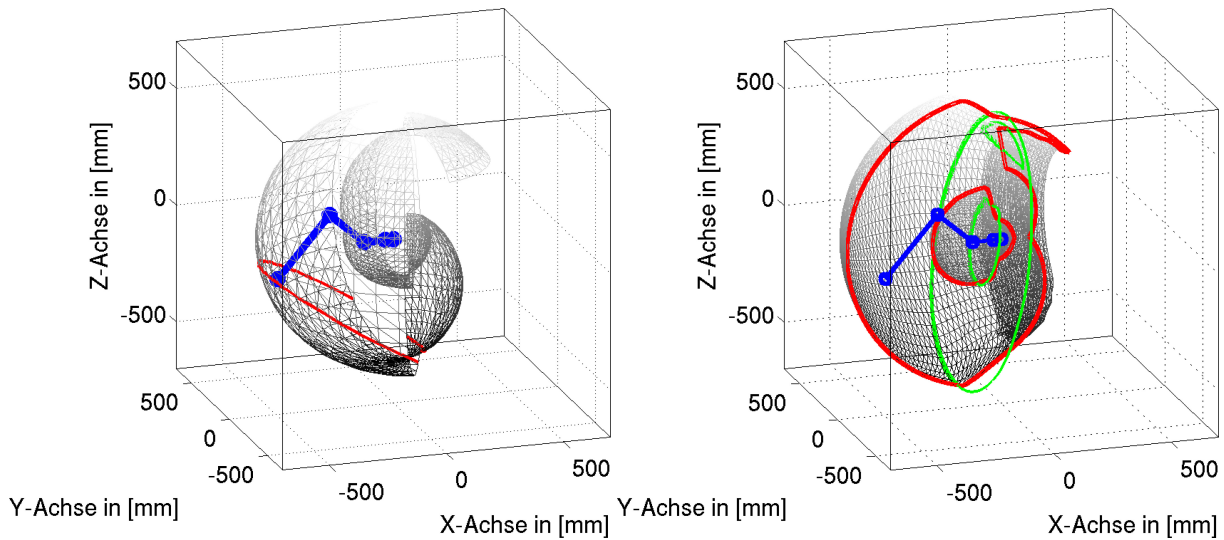


Bild 5.7.: Oberflächendarstellung der Arbeitsräume der Laufroboterbeine von *LAURON IVc* (links) und *LAURON V* (rechts). Deutlich zu erkennen ist die komplexere Form des Arbeitsraumes von *LAURON V*, die durch die Redundanz in der Kinematik entsteht. Quelle [Koc10]

schrägen Hang eingesetzt werden kann. In der Abbildung 5.7 links ist ein schräger Schnitt durch den Arbeitsraum in rot angedeutet. Anhand dieses Schnittes kann geprüft werden, ob es ggf. sinnvoll ist das Bein am Zentralkörper mit einer gewissen Neigung zu montieren (siehe Kapitel 6). In der Abbildung 5.8 sind zwei Schnitte durch den Arbeitsraum des *LAURON V* Beines dargestellt. Die Lage dieser Schnitte ist rechts in Abbildung 5.7 farbige (rot und grün) eingezeichnet. Die blauen Punkte in der Abbildung 5.8 sind Ergeb-

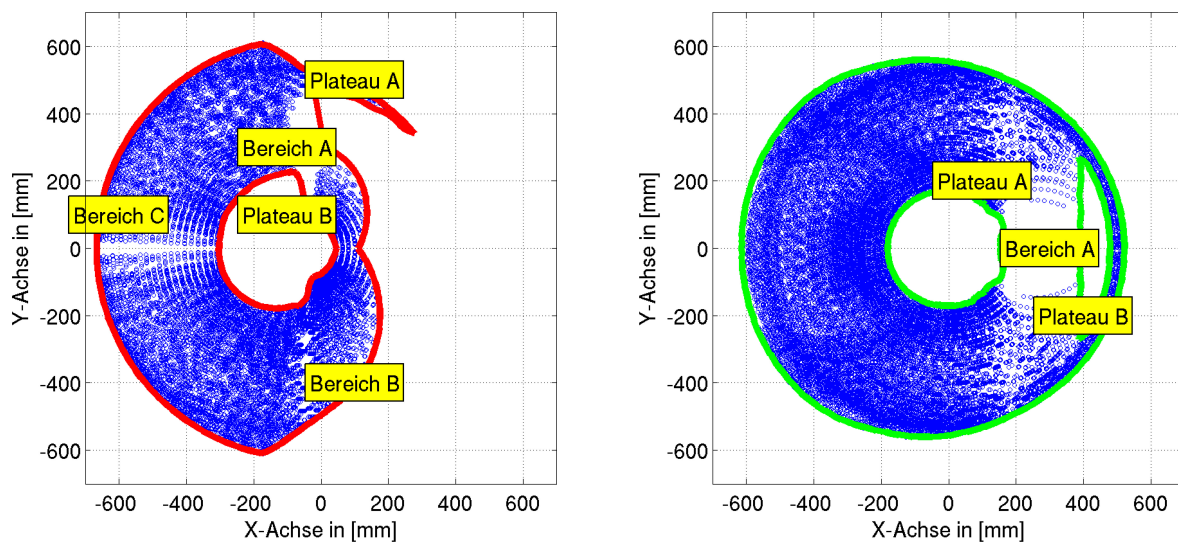


Bild 5.8.: (links): roter, horizontaler Schnitt durch den Arbeitsraum von *LAURON V*, (rechts): grüner, vertikaler Schnitt durch den Arbeitsraum von *LAURON V*, siehe Abbildung 5.7. Quelle [Koc10]

nisse der äquidistanten Abtastung im Gelenkwinkelraum. Es ist sofort zu erkennen, dass die resultierenden Punkte im kartesischen Raum keine äquidistanten Abstände aufweisen. Weiter ist ein Hohlraum (Plateau B) in der Mitte des Arbeitsraumes zu erkennen. Dieser Hohlraum war in der 3D-Ansicht schwer sichtbar. In den Bereichen B und C sind vor allem die unterschiedlichen Punktdichten gut erkennbar. Grundsätzlich wäre eine gleichmäßigere Punktdichte vorzuziehen, jedoch müsste hierfür der kartesische Raum äquidistant abgetastet werden. Zum einen müsste dann in jedem Abtastschritt die aufwändigere, inverse Kinematik

gelöst werden. Des Weiteren ist die Lösung der inversen Kinematik nicht immer eindeutig und zum anderen könnten die exakten Ränder des Arbeitsraumes nicht mit einer so hohen Auflösung gefunden werden. Durch die polynom-basierte Darstellung ist die Präzision vor allem im kritischen Randbereich höher. Jedoch entstehen durch diese Darstellungsform auch Ungenauigkeiten wie im Bereich A im linken Teil der Abbildung 5.8 zu sehen ist. Hier liegen keine Punkte im Arbeitsraum und nach einer detaillierten Analyse konnte nachvollzogen werden, dass dies ein weiterer Hohlraum ist (Plateau B), der tatsächlich mit dem Hohlraum in der Mitte verbunden ist. Die polynom-basierte Darstellung konnte diese komplexe Form nicht erfassen. Jedoch stört diese Ungenauigkeit nicht die Analyse des Arbeitsraumes, da der Bereich A in einem extremen Randbereich liegt, der nicht für das Laufen relevant ist. Auch die sehr schmalen Bereiche im rechten oberen Randbereich sind Extrembereiche, die für den praktischen Einsatz des Roboterbeins irrelevant sind. In der Abbildung 5.8 ist rechts der gleiche Arbeitsraum anhand eines vertikalen Schnitts dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass im Bereich A weiterhin keine Punkte liegen. Außerdem sind auch die beiden Plateaus A und B eingezeichnet. In dieser Darstellung ist besser zu erkennen, dass die Plateaus verbunden sind und einen komplexen 3D-Schlauch bilden. Die Schnitte werden verwendet um Fähigkeiten der Beine bewerten. So können zum Beispiel die potentiellen *Schritthöhen* oder die maximalen *Schrittweiten* hergeleitet werden (siehe Abbildung 5.9). Rechts in der Abbildung 5.9 wird die *Schrittweite* entlang der Y-Achse des Roboterkoordinatensystems im vereinfachten Arbeitsraum betrachtet (siehe Abbildung 5.2). Die Analyse untersucht nicht die *Schrittweite* der Vorzugslaufrichtung entlang der X-Achse, sondern die *Schrittweite* beim krebsartigen Laufen in Richtung der Y-Achse. Entsprechend kann die Analyse rechts in Abbildung 5.9 auch verwendet werden um die mögliche Stand- und Laufbreite des Roboters zu bewerten.

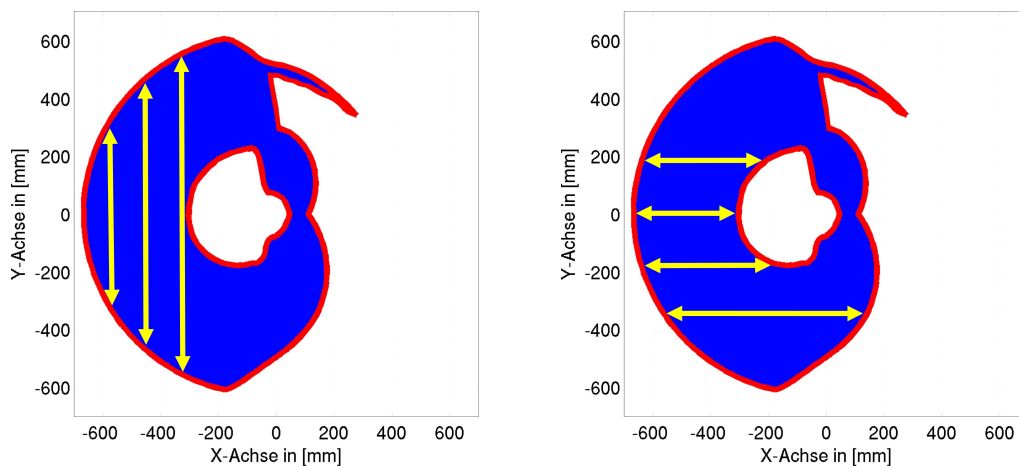


Bild 5.9.: Analyse des vereinfachten Arbeitsraumes anhand eines Schnitts: (links) Extraktion möglicher *Schritthöhen*, (rechts) Extraktion möglicher *Schrittweiten* in Y-Richtung. Quelle (modifiziert) [Koc10]

Die Analyse des Arbeitsraumes über die äquidistante Abtastung im Gelenkwinkelraum ist ein wichtiges Analysewerkzeug um das kinematische Potential eines Roboterbeins zu untersuchen [Koc10]. Aus dem Arbeitsraum lässt sich erkennen, welche Bereiche von den Beinen erreicht werden können. Weiter lassen sich wichtige Eigenschaften ableiten wie z.B. die maximalen *Schrittweiten* oder *Schritthöhen*. Die systematischen Schnitte entlang verschiedener Raumachsen erlauben es auch komplexe 3D-Geometrien zu erfassen, zu verstehen und systematisch auszuwerten.

5.2.2. Geschwindigkeitspotentiale im Arbeitsraum

Der erreichbare Arbeitsraum hat nicht überall die gleichen Eigenschaften, wie die vereinfachte Darstellung in Abbildung 5.9 vermuten lässt. Die sehr unterschiedlichen Punktdichten im kartesischen Raum, die sich aus der äquidistanten Abtastung im Gelenkwinkelraum ergibt, ist bereits ein starker Indikator dafür, dass sich der Arbeitsraum unterschiedlich verhält (siehe Abbildung 5.8). Eine interessante Möglichkeit die Kinematik eines Roboters systematisch zu analysiert basiert auf dem Einsatz der Jakobimatrix. Die Jakobimatrix eines Roboters kann verwendet werden um Winkelinkremente $\Delta\Omega = [\Delta\omega_1, \dots, \Delta\omega_N]$ in Positions- und Orientierungsinkremente im kartesischen Raum umzurechnen. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen den Geschwindigkeiten im Gelenkwinkelraum $\dot{\Omega}$ zu den Geschwindigkeiten im kartesischen Raum $V_{foottip}(x,y,z,r,p,y)$ [203][Koc10].

$$V_{foottip}(x,y,z,r,p,y) = J(\Omega)\dot{\Omega} \quad (5.6)$$

Die Matrix $J(\Omega)$ wird als Jakobimatrix bezeichnet und definiert indirekt die kinematischen Eigenschaften des Roboters. Mit Hilfe der Jakobimatrix kann das direkte kinematische Problem gelöst werden. Die Dimension des Gelenkwinkelvektors ω hängt von der Anzahl der Gelenke N ab.

$$\Omega = [\omega_1, \dots, \omega_N]^T \quad (5.7)$$

Yoshikawa hat gezeigt, dass die Jakobimatrix gut verwendet werden kann um den Arbeitsraum systematisch zu analysieren[235][Koc10]. Er definiert die *Manipulierbarkeit* über den Determinanten-Ausdruck:

$$w = \|\det J(\Omega)\| \quad (5.8)$$

Diese Gleichung kann jedoch nur verwendet werden, wenn es sich bei der Jakobimatrix um eine quadratische Matrix handelt. Im allgemeineren Fall muss mit der Pseudo-Jakobimatrix gearbeitet werden[Koc10]:

$$w = \sqrt{\det J(\Omega) J(\Omega)^T} \quad (5.9)$$

Der gesamte Arbeitsraum soll mit diesen Erkenntnissen hinsichtlich der *Manipulierbarkeit* untersucht werden. Die *Manipulierbarkeit* ist ein Maß dafür, welche kartesischen Geschwindigkeiten bei einer Gelenkwinkelkonfiguration Ω möglich sind. Vorteilhaft ist die Zerlegung der Jakobimatrix in Singulärwerte, wie dies von *Yoshikawa* in [235] hergeleitet wird, um sogenannte Geschwindigkeits-Ellipsoiden pro Gelenkwinkelkonfiguration Ω zu erhalten:

$$J = U\Sigma V^T \quad (5.10)$$

Der Spaltenvektor U beschreibt hierbei ein System aus drei orthogonalen Vektoren $U = [u_1, u_2, \dots, u_M]$, die die drei Richtungen der Geschwindigkeit des Geschwindigkeits-Ellipsoiden beschreiben. Weiter gilt $U \in R^{N \times N}$ und $M :=$ Anzahl der Dimensionen im kartesischen Raum sowie $N :=$ Anzahl der Gelenke. Dann ergeben

sich die Singulärwerte mit $\Sigma \in R^{M \times N}$ und $V \in R^{M \times M}$ zu:

$$\Sigma = \left[\begin{array}{ccc|c} \sigma_1 & & 0 & 0 \\ & \sigma_2 & & 0 \\ & & \dots & \dots \\ & & & \dots \\ 0 & & & \sigma_M \\ & & & 0 \end{array} \right] \quad (5.11)$$

Dies vereinfacht die Berechnung der *Manipulierbarkeit*:

$$w = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \dots \sigma_M \quad (5.12)$$

Dabei gilt durch die Singulärwertzerlegung stets $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_M \geq 0$. Das Volumen V des Geschwindigkeits-Ellipsoiden kann wie folgt ermittelt werden.

$$V = d \cdot w \quad (5.13)$$

Der Faktor d hängt von der betrachteten Anzahl der Dimensionen im kartesischen Raum M ab. Hier werden oft nur die drei Positionsdimensionen ($M = 3$) oder alle sechs Dimensionen betrachtet ($M = 6$).

$$d = \begin{cases} \frac{(2\pi)^{M/2}}{2 \cdot 4 \dots (M-2) \cdot M} & M \text{ gerade} \\ \frac{2 \cdot (2\pi)^{(M-1)/2}}{1 \cdot 3 \dots (M-2) \cdot M} & M \text{ ungerade} \end{cases} \quad (5.14)$$

Sollten die Gelenke des Beines unterschiedliche Aktoren oder Getriebeübersetzungen haben, ist es sinnvoll die Leistungsunterschiede durch eine Normierung der Geschwindigkeits-Ellipsoiden nach Yoshikawa vorzunehmen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden bei der kinematischen Analyse nach Yoshikawa nur die Positionen der Fußspitzen betrachtet [Roennau et al., 2013a][Koc10]. Für die Laufbewegung mit mehrbeinigen Robotern ist es nicht notwendig die Orientierung der Füße zu betrachten, deswegen kann hier $M = 3$ angenommen werden. Die drei Singulärwerte $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ können nach einer Normierung anhand der Antriebsleistung sowie einer Normalisierung auf den Wertebereich $[0; 1]$ direkt als Ausdehnung des Geschwindigkeits-Ellipsoiden in das Koordinatensystem des Beins eingetragen werden. Somit ergeben sich bei der äquidistanten Abtastung aller Gelenkwinkelkonfigurationen Ω_i entsprechend i Geschwindigkeits-Ellipsoiden V_i . In der Abbildung 5.10 sind im oberen Teil beispielhaft Geschwindigkeits-Ellipsoiden für das Bein von LAURON V dargestellt. Für eine bessere Übersichtlichkeit wurden nur die Gelenke BETA und GAMMA variiert (siehe Gelenkdefinition LAURON in Abschnitt A.2). Die unterschiedlichen Bereiche mit kleineren bzw. größeren Geschwindigkeits-Ellipsoiden sind in der Abbildung gut zu erkennen. Die Trajektorien der Laufbewegungen sollten gezielt in Bereichen mit einer hohen *Manipulierbarkeit* gelegt werden. Mit der Normierung auf den Wertebereich $[0; 1]$ ist es möglich eine schnittbasierte Darstellung des Arbeitsraumes zu verwenden ($1,0 :=$ beste *Manipulierbarkeit*). Die abgetasteten Punkte innerhalb der Schnitte werden farbige dargestellt umso die *Manipulierbarkeit* intuitiv darzustellen. Im unteren Teil der Abbildung 5.10 sind die Ergebnisse der Geschwindigkeitsanalyse anhand von Schnitten beispielhaft für das LAURON V Bein dargestellt. Zu sehen sind hier insgesamt 3 Schnitte entlang verschiedener Orientierungen durch den Arbeitsraum. Für eine bes-

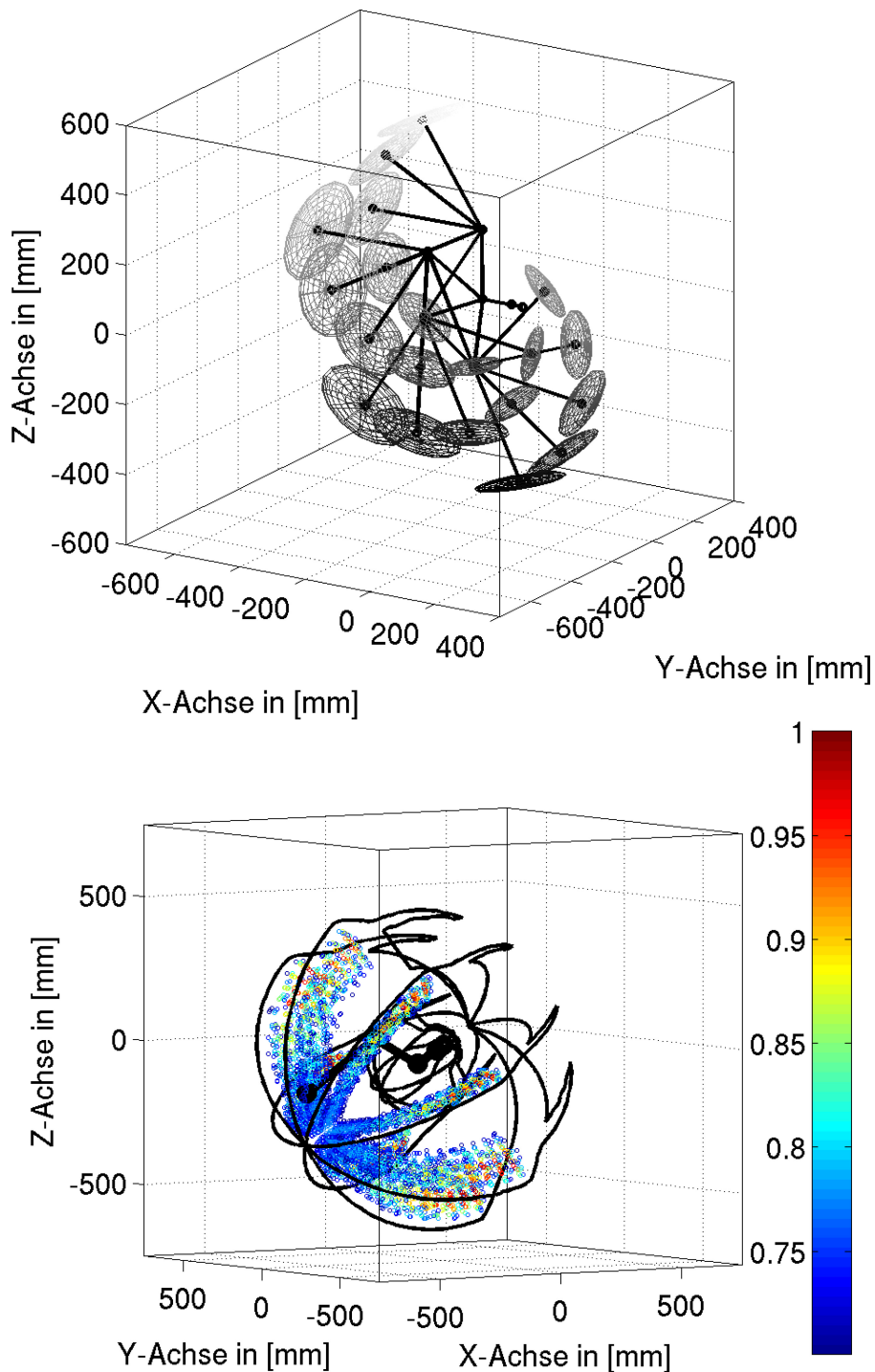


Bild 5.10.: Analyse der kinematischen Fähigkeiten am Beispiel des *LAURON V* Beins: (oben) Geschwindigkeits-Ellipsoiden zur Beschreibung der Manipulierbarkeit nach Yoshikawa[235], (unten) drei Schnitten durch den Arbeitsraum mit den normierten, farblich dargestellten Geschwindigkeits-Ellipsoiden -hier wurden nur Punkte mit einer *Manipulierbarkeit* $w \geq 0,7$ dargestellt. Quelle [Koc10]

sere Übersicht wurden im unteren Teil der Abbildung 5.10 nur Bereiche mit einer guten *Manipulierbarkeit* von $w \geq 0,7$ dargestellt.

Die Analyse der Kinematik und dessen Geschwindigkeitspotential ist eine gute Methode um die Güte des Arbeitsraumes zu analysieren. Die Methodik dieser kinematischen Analyse wurde im Rahmen einer wissenschaftlichen Publikation auch bereits erfolgreich veröffentlicht[Roennau et al., 2013a]. Aus der

Manipulierbarkeit bzw. den Geschwindigkeits-Ellipsoiden kann abgeleitet werden, welche Bereiche des Arbeitsraumes bevorzugt zum Laufen verwendet werden sollten. Der Einsatz von farbigen Schnitten durch den Arbeitsraum erlaubt es komplexe Arbeitsräume verständlich zu untersuchen und zu bewerten. So können die Entwickler von Laufrobotern bereits bei der kinematischen Auslegung des Roboters prüfen, ob die Laufbewegungen im besten Bereich des Arbeitsraumes liegen. Außerdem können auch die Fußtrajektorien bestehender Systeme auf Basis dieser Analysen angepasst werden.

5.2.3. Interaktive Bewegungstrajektorien

Um die Erkenntnisse aus den vorangegangenen kinematischen Analysen des Arbeitsraumes und der Geschwindigkeitspotentiale auch effizient nutzen zu können, sind Methoden und Werkzeuge notwendig, die es erlauben die Beintrajektorien einfach und schnell anzupassen. So kann die Beintrajektorie einfach in den günstigeren Arbeitsraum verlegt werden, aber auch schnell Effekte auf die Stabilität, Geschwindigkeit und Energieeffizienz evaluiert werden. In der Biologie werden Bewegungstrajektorien oft durch zeitliche Verläufe der einzelnen Winkel in sogenannten *Gelenkwinkel-Plots* dargestellt (siehe z.B. [178]). Alternativ gibt es die *Stick Diagram*-Darstellung, bei der das Bein in verschiedenen Phasen der Laufbewegung in einem Bild überlagert dargestellt wird (siehe z.B. [231]). Bei dieser Form entsteht ein qualitativer Eindruck der Laufbewegung, bei der keine Gelenkwinkel aber grobe kartesische Fußkoordinaten dargestellt werden. Beide Varianten der Trajektorien-Darstellung sind für den Einsatz mit Robotern nur bedingt geeignet, da sich so nur schwer die exakte Position der Fußspitze erkennen lässt. Die häufigste Form der Bewegungstrajektorien-Darstellung in der Robotik ist die *kartesische Darstellung*. Dabei werden in der Regel nur zwei Dimensionen der Bewegung erfasst, da vereinfachend davon ausgegangen wird, dass die Beinbewegung innerhalb einer Ebene stattfindet. Bei der *kartesischen Darstellung* gibt es noch weitere, unterschiedliche Repräsentationsformen, die in Abbildung 5.11 beispielhaft dargestellt sind. Links in der Abbildung ist der zeitliche Verlauf

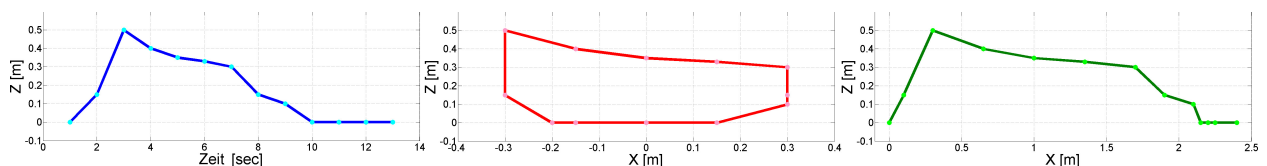


Bild 5.11.: Kartesische Darstellung von Bewegungstrajektorien: (links) Höhenveränderung über die Zeit, (mittig) Höhen- und Positionsveränderung in Roboterkoordinatensystem, (rechts) Höhen- und Positionsveränderung in Weltkoordinatensystem. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2014a]

der Höhe (Z-Dimension) der Bewegungstrajektorien aufgetragen. In der Mitte ist die Bewegungstrajektorie im Roboterkoordinatensystem mit der Höhe (Z-Dimension) und der Laufrichtung zu sehen (X-Dimension). Alternativ kann auch das Weltkoordinatensystem als Bezugssystem verwendet werden (siehe rechten Teil der Abbildung 5.11). Die Darstellung der Trajektorie lässt sich von der einen Form in die andere problemlos umrechnen, wenn alle notwendigen Informationen gegeben sind. In dieser Arbeit soll die mittlere Darstellungsform, die kartesische Repräsentation im Roboterkoordinatensystem, verwendet werden [Hel12].

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte neue Methode zur Modellierung von interaktiven Bewegungstrajektorien wurde bereits erfolgreich veröffentlicht [Roennau et al., 2014a]. Um eine einfache mathematische Modellierung zu ermöglichen wird die Trajektorie in vier Segmente aufgeteilt, die durch die vier Basis-Punkte BP_0 , BP_1 , BP_2 und BP_3 definiert werden. Das Segment S_1 beschreibt die Abhebbewegung am Ende der Stemmphase, das Segment S_2 die Schwingbewegung in der Luft und die Absetzbewegung ist

durch S_3 definiert. Die Stembewegung während des Bodenkontakts erfolgt entlang des Segments S_0 . Die Basis-Punkte mit den dazugehörigen Segmenten sind in der Abbildung 5.12 nochmals dargestellt.

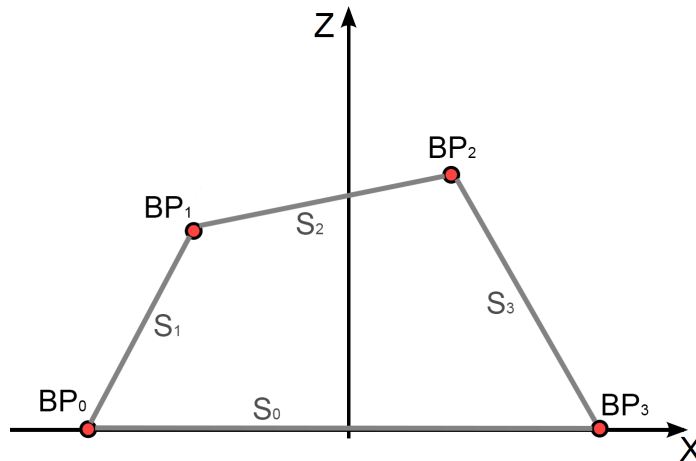


Bild 5.12.: Definition einer Bewegungstrajektorie anhand der vier Basis-Punkte BP_0 , BP_1 , BP_2 und BP_3 mit den dazugehörigen Segmenten S_0 , S_1 , S_2 und S_3 . Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2014a]

Die Segmente S_1 , S_2 und S_3 werden durch eine Beziérkurve fünften Grades definiert und können einfach nahezu beliebig verändert werden. Jedes Segment besitzt zwei Gradient-Punkte GP_{ij} , die die Krümmung der Segmente in der Nähe des Basis-Punkts festlegen. Die Gradient-Punkte beeinflussen den Übergang zwischen zwei Segmenten. Da eine Beziérkurve stets durch die Basispunkte verläuft, gibt es einen definierten Übergang von einem Segment zum nächsten. In der Abbildung 5.13 ist zu erkennen, dass die Gradient-Punkte zweier benachbarter Segmente auf einer Linie durch den Basis-Punkt liegen müssen, um einen stetigen Übergang zwischen den Segmenten zu erreichen. Der Abstand der Gradient-Punkte zum Basis-Punkt beeinflusst die Krümmung des Segments in der Nähe des Basis-Punktes (vergleiche oben und mittig in der Abbildung 5.13). Unstetige Übergänge zwischen den Segmenten sind ebenfalls wie in der Abbildung 5.13 zu erkennen möglich. Insgesamt werden pro Segment vier Punkte verwendet um die Form des Segments zu

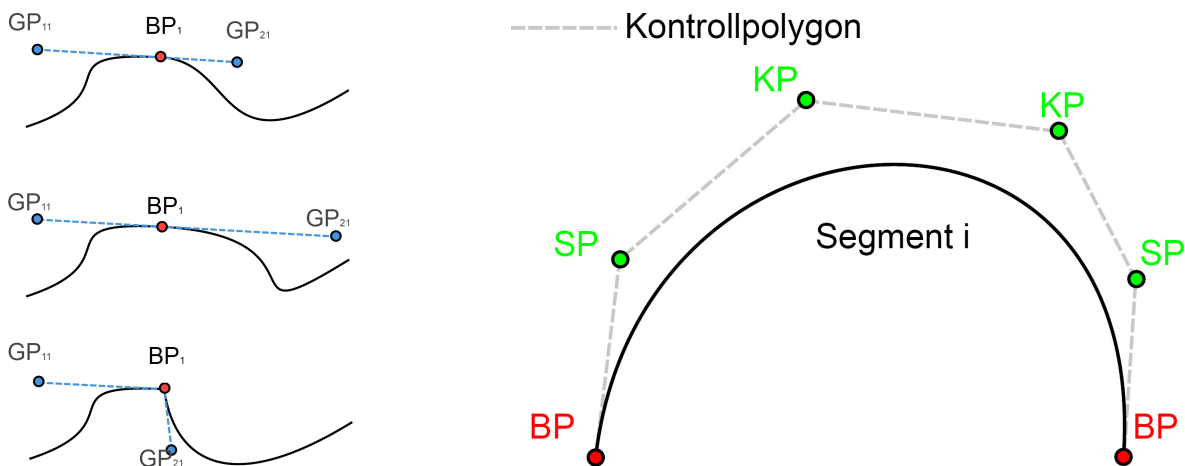


Bild 5.13.: Eigenschaften der Beziérkurven: (links) Die Gradient-Punkte beeinflussen die Krümmung des Segments im Basis-Punkt. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2014a]: (links oben) Gradient-Punkte zu einem Basis-Punkt liegen auf einer Linie - somit ist ein stetiger Übergang der Segmente einfach realisierbar, (links mittig) der Abstand der Gradient-Punkte beeinflusst die Krümmung, (links unten) liegen die Gradient-Punkte nicht auf einer Graden können auch nicht-stetige Übergänge zwischen Segmenten erzeugt werden, (rechts) das Sechsertupel $(KP_i, GP_{ji}, SP_{ji}, SP_{jj}, GP_{jj}, KP_j)$ definiert die Form eines Segments. Quelle [Hel12]

definieren. Neben den zwei Gradient-Punkten GP_{ij} werden die Shape-Punkte SP_{ij} verwendet um die Form des Segments zu beeinflussen. Gemeinsam mit den zwei Basis-Punkten am Anfang und Ende des Segments bilden sie ein Sechstertupel $(KP_i, GP_{ji}, SP_{ji}, SP_{jj}, GP_{jj}, KP_j)$, das sogenannte Kontrollpolygon der Beziérkurve. Rechts in der Abbildung 5.13 ist gut zu erkennen wie die sechs Punkte die Form des Segments definieren. Mathematisch lassen sich die Segmente wie folgt definieren:

$$S_1(t) = \sum_{k=0}^5 \binom{5}{k} t^k (1-t)^{5-k} P_{1k} \quad (5.15)$$

$$S_2(t) = \sum_{k=0}^5 \binom{5}{k} t^k (1-t)^{5-k} P_{2k} \quad (5.16)$$

$$S_3(t) = \sum_{k=0}^5 \binom{5}{k} t^k (1-t)^{5-k} P_{3k}, \quad (5.17)$$

Wobei hier P_{1k} , P_{2k} und P_{3k} jeweils das k -te Element der Mengen P_1 , P_2 , P_3 ist:

$$P_1 = \{BP_0, GP_{10}, SP_{10}, SP_{S11}, GP_{11}, BP_1\},$$

$$P_2 = \{BP_1, GP_{21}, SP_{21}, SP_{S22}, GP_{22}, BP_2\},$$

$$P_3 = \{BP_2, GP_{32}, SP_{32}, SP_{S33}, GP_{33}, BP_3\}$$

Das Segment S_0 wird nicht durch eine Beziérkurve definiert, sondern einfach linear zwischen den beiden Basis-Punkten BP_0 und BP_3 interpoliert.

$$S_0(t) = (BP_0 - BP_3) \cdot t + BP_3 \quad (5.18)$$

So reduziert sich die Anzahl der Punkte zur Definition einer beliebig geformten Bewegungstrajektorie auf insgesamt 16. In der Abbildung 5.14 ist eine beispielhafte Bewegungstrajektorie modelliert, die sich an der Bewegungstrajektorie von Hunden orientiert.

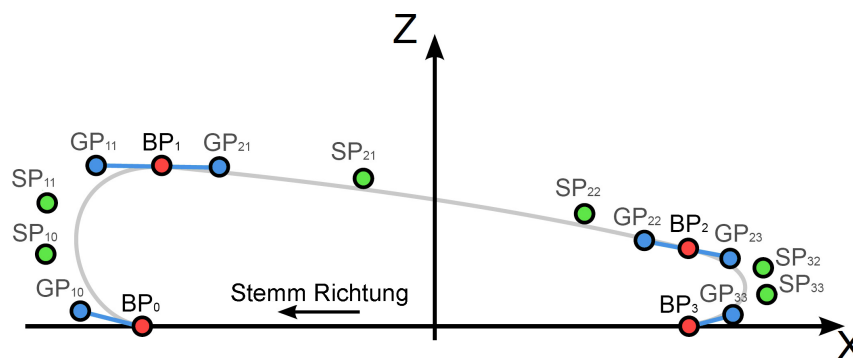


Bild 5.14.: Komplexe, leicht veränderbare Bewegungstrajektorie: Modellierung einer Bewegungstrajektorie anhand der Laufbewegung bei Hunden. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2014a]

Die interaktiven Bewegungstrajektorien sind ein wichtiges Werkzeug zur systematischen Analysen mehrbeiniger Laufbewegungen. Sie bieten neben einer mathematisch eindeutigen, klaren Definition der Trajektorie sehr viele Freiheiten bei der Definition der Trajektorien. Auch wenn es für die Aktuatorik sehr schädlich wäre, ist es sogar möglich rechteckige, nicht-stetige Formen zu erstellen. Gleichzeitig unterstützt ein Werkzeug dabei stetige Übergänge zwischen den Segmenten zu garantieren, indem die Gradient-Punkte auf einer

Linie liegen. Die direkte, intuitive Interaktion ermöglicht es schnell verschiedene Trajektorienformen zu analysieren und evaluieren.

5.3. Dynamische Analysewerkzeuge

Laufroboter sind nicht nur statischen, sondern auch dynamischen Momenten und Kräften, wie sie z.B. beim Abrutschen von einem Hindernis entstehen, ausgesetzt. Die Analyse solcher Effekte ist schwierig, da sie sich nur mit sehr großem Aufwand reproduzieren und systematisch untersuchen lassen. Auch können dynamische Belastungen wie bei einem Sturz oder einer heftigen Kollision den Laufroboter stark beschädigen und werden deswegen in der Regel von den Entwicklern vermieden. Mit Simulationsumgebungen können diese dynamischen Belastungen sowie Effekte sicher und reproduzierbar analysiert werden. In diesem Abschnitt wird eine speziell für Laufroboter entwickelte Simulationsumgebung und dynamische Analysewerkzeuge vorgestellt.

5.3.1. Dynamik Simulation für mehrbeinige Laufroboter

Die Simulation von Robotersystemen wird an vielen Stellen verwendet um aufwändige oder gefährliche Experimente unter gleichbleibenden Bedingungen wiederholen zu können. In den letzten Jahren haben sich die verfügbaren Robotersimulationssysteme wie Gazebo, Webots, VREP und USARSim stets weiterentwickelt [130][149][181][45]. Der aktuelle Gazebo-Simulator bietet z.B. eine sehr gute Integration mit dem viel verwendeten Software-Framework ROS und kann schnell und einfach für verschiedene Simulationaufgaben verwendet werden [130][174]. Jedoch fokussiert sich keiner der Simulationssysteme auf das mehrbeinige Laufen. Da die Anforderungen mehrbeiniger Laufroboter von den bisherigen Simulationssystemen nicht erfüllt werden, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neues dynamisches Simulationssystem entwickelt[Sut12]. An dieser Stelle sollen die wichtigsten Erkenntnisse und Designentscheidungen bei der Entwicklung der *RoADS - Robot and Dynamics Simulation* - zusammengefasst werden. Zunächst wurde evaluiert welche Physik-Engine für die Simulationsumgebung verwendet werden soll. Die Physik-Engine ist verantwortlich für die Berechnung der verschiedenen physikalischen Effekte zwischen den Objekten in der Simulationsumgebung. Alle echtzeitfähigen Physik-Engines arbeiten mit numerischen Solvern um die komplexen Differentialgleichung schnell und effizient lösen zu können. Da es sich hierbei jedoch nicht um analytisch exakte Lösungen handelt, leiden alle bekannten Physik-Engines unter gewissen Simulationsungenauigkeiten.

Um für *RoADS* die am besten geeignete Physik-Engine auszuwählen, die die speziellen Anforderungen für Laufroboter erfüllt, wurden die drei besten Kandidaten (*Bullet*, *ODE*, *PhysX*) in einigen speziellen Experimenten gegeneinander evaluiert (Versionen der eingesetzten Engines siehe hier: *Bullet*[42], *ODE*[212], *PhysX*[213]). In der Abbildung 5.15 ist z.B. ein solches virtuelles Experiment dargestellt. Es wird eine Pyramide aus beweglichen Würfeln aufgebaut und gezeigt, dass alle drei Physik-Engine durch numerische Ungenauigkeiten nicht in der Lage sind die Pyramide über einen längeren Zeitraum in der Simulation stabil aufrecht zu halten. Insbesondere die Kontaktkräfte von aufeinander ruhenden Objekten sind eine Schwachstelle aller Physik-Engines.

Alle drei Physik-Engines bieten die Möglichkeit den internen Solver in der Genauigkeit zu verbessern und so die Präzision der Simulation zu erhöhen. Um die Simulationsgüte zu bewerten wurde ein einfacher Turm aus Würfeln aufgestapelt (siehe links in Abb. 5.16). Bleibt der Stapel 20 Sekunden lang stabil stehen, gilt der Turm als stabil und es wird ein weiterer Würfel leicht verdreht auf den Stapel gestellt[Sut12]. In

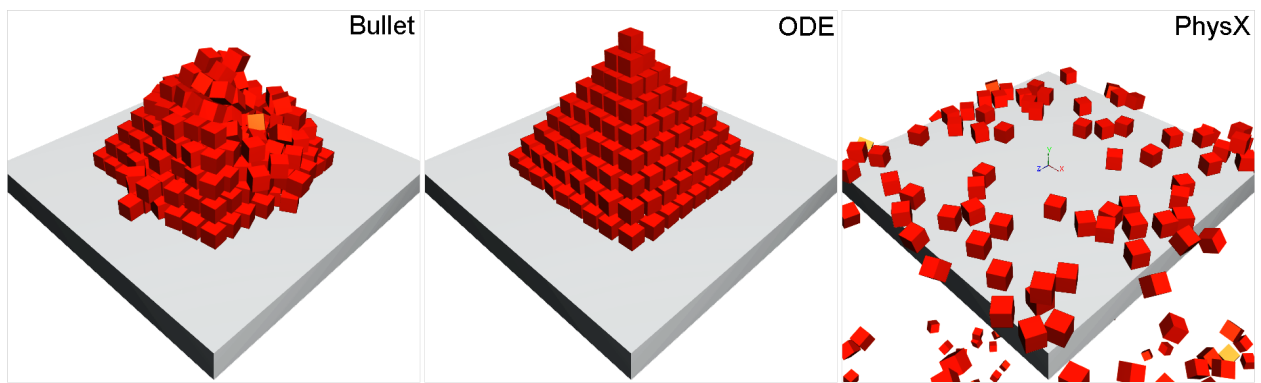


Bild 5.15.: Der Vergleich der drei Physik-Engines *Bullet*, *ODE*, *PhysX* beim Bau einer Pyramide offenbart, dass alle Schwierigkeiten mit numerischer Stabilität haben. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2013b]

der Tabelle 5.1 sind die Ergebnisse für die drei Physik-Engines jeweils in der normalen Güte und in hoher Präzision dargestellt.

| Bullet | | ODE | | PhysX | |
|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| Normale Güte | Hohe Präzision | Normale Güte | Hohe Präzision | Normale Güte | Hohe Präzision |
| 6 | 16 | 11 | >30 | 16 | >30 |

Tabelle 5.1.: Stapel-Experiment: Anzahl der Würfel, die stabil auf einem Turm stehen bleiben (siehe links in Abb. 5.16). Es wurden maximal 30 Würfel zu einem Turm aufgebaut. Simulation wurde jeweils mit normaler Simulationsgüte und höher, präziser Simulationsgüte durchgeführt. Quelle (modifiziert) [Sut12]

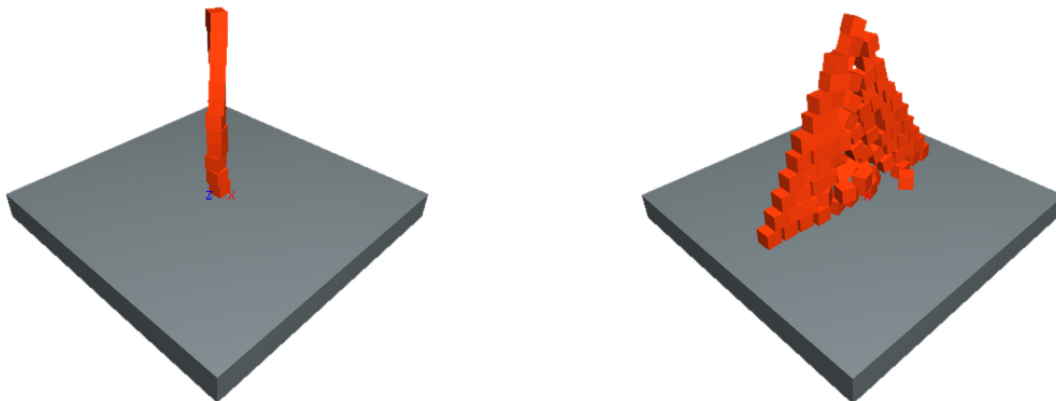


Bild 5.16.: Stapel Experiment zeigt die Schwierigkeiten aller Physik-Engines mit multiplen Kontaktkräften. Quelle [Sut12]

Keine der Physik-Engines ist in der Lage mit der normalen Güte einen besonders hohen Turm zu simulieren. Mit der verbesserten Simulationsgüte erreichen *ODE* und *PhysX* gute Werte. Betrachtet man jetzt jedoch noch die Simulationszeit, wird klar, dass diese höhere Güte bei *ODE* durch eine sehr hohe Rechenzeit erkauft wird [Roennau et al., 2013b] [Sut12]. In der Abbildung 5.17 ist der Verlauf der durchschnittlichen Rechenzeit anhand der Anzahl der Würfel auf dem Stapel dargestellt. Hierfür wurden die Würfel jedoch nicht auf einem Stapel, sondern in einer einfachen Pyramide aufgebaut (siehe Abbildung 5.16 rechts). Auffällig ist vor allem der nichtlineare Verlauf der Rechenzeit bei *ODE*. Bereits bei diesem einfachen Experiment werden Simulationszeiten erreicht, die den Einsatz von *ODE* mit hoher Präzision als Physik-Engine für den Laufroboter-Simulator ausschließen. Bei normaler Simulationsgüte ist der Verlauf der Rechenzeit bei allen drei Engines linear.

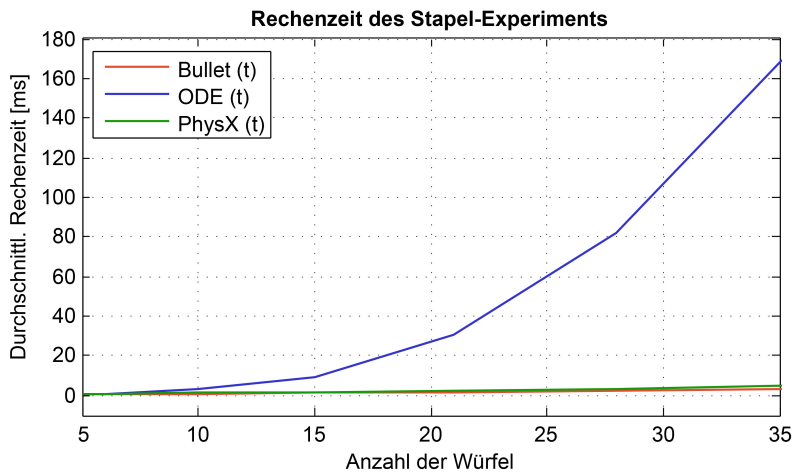


Bild 5.17.: Nichtlineare Rechenzeit bei hoher Simulations-Güte von *ODE* kritisch für Laufroboter-Simulation. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2013b]

Die Erkennung von Kollisionen ist eine der wichtigsten Funktionen von Physik-Engines, da diese vor allem verwendet werden um Reaktionskräfte zu berechnen, aber auch die Basis für die Interaktion des Roboters mit der Umgebung bilden. Zahlreiche virtuelle Experimente wurden durchgeführt um die Qualität der Kollisionserkennung der drei Physik-Engines zu evaluieren[Sut12]. Insbesondere hohe Kollisionsgeschwindigkeiten, aber auch kleine Objekte, die mit einem Mesh kollidieren stellen eine Herausforderung dar. In der Abbildung 5.18 ist gut zu erkennen wie einige der sphärischen Grundkörper durch ein Mesh durchfallen und die Kollisionen nicht erkannt werden. Diese Erkenntnis ist wichtig um das richtige Größenverhältnis des Robotermodells und die Auflösung der Umgebungsoberfläche zu wählen.

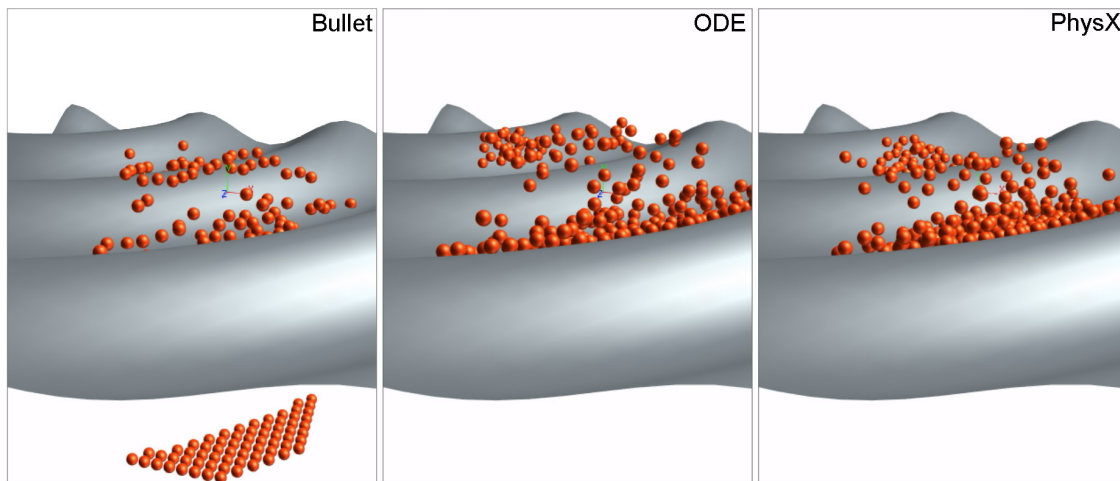


Bild 5.18.: Kollisionen kleiner Grundkörper mit einem Oberflächen-Mesh werden je nach Auflösung des Meshes nicht erkannt. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2013b]

Für die Simulation von Laufrobotern spielt die Reibung der Füße mit dem Untergrund eine wichtige Rolle. Aus diesem Grund wurde ein virtuelles Experiment konzipiert, das analysiert wie exakt Reibungseffekte bei den verschiedenen Physik-Engine berücksichtigt werden. Folgt man dem Coulombschen Reibungsmodell dann sollte die Reibung wie im linken Teil der Abbildung 5.19 als Kegel mit der maximalen Kraft F_{max} modelliert werden. In diesem Fall führt die externe Kraft F_1 dazu, dass sich das Objekt bewegt, da die Reibkraft F_{f_1} nicht in der Lage ist der Kraft F_1 entgegen zu wirken, da diese außerhalb des Reibkegels

liegt. Die Kraft F_2 hingegen kann kompensiert werden und das Objekt wird sich nicht bewegen. Häufig verwenden Physik-Engines nur Approximationen des Reibkegels. Aus der Dokumentation von *ODE* ist z.B. bekannt, dass diese Engine eine einfache Reibpyramide verwendet (siehe rechts in Abbildung 5.19). Bei dieser Reibpyramide gibt es je nach Grundform zwei maximale Reibkräfte F_{max1} , und F_{max2} . In diesem Beispiel kann die Reibpyramide fälschlicherweise die Reibkraft F_{f1} für die externe Kraft F_1 kompensieren. Das Objekt bewegt sich nicht, obwohl es dies in der Realität täte. Um genauer erfassen zu können wie die Modellierung der Reibung in den Engines aussieht wurde ein virtuelles Experiment entwickelt, dass es erlaubt die Form des Reibkörpers zu identifizieren.

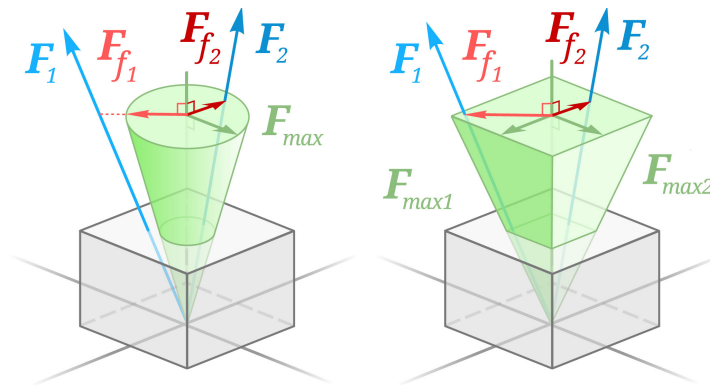


Bild 5.19.: Reibungsmodell: (links) Coulombschen Reibkegel, (rechts) vereinfachte Reibpyramide. Die externe Störkraft F_2 kann von beiden Reibungsmodellen kompensiert werden. Die Störkraft F_1 kann bei dem richtig modellierten Reibkegel (links) von der Reibkraft F_{f1} nicht kompensiert werden. Die einfache Reibpyramide (rechts) kompensiert diese Störkraft jedoch mit der zu großen Reibkraft F_{f1} und das Objekt würde sich fälschlicherweise bewegen. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2013b]

Wie in der Abbildung 5.20 zu erkennen ist, ist *Bullet* die einzige Physik-Engine, die sich der Coulombschen Referenz annähert. Die anderen Physik-Engine nutzen nicht mal einen Kegel, sondern eine einfachere Pyramide, die den physikalischen Effekt nicht korrekt approximiert. In zahlreichen weiteren virtuellen Experimenten wurden die drei Kandidaten *Bullet*, *ODE* und *PhysX* intensiv untersucht. Die Erkenntnisse sind in der Tabelle 5.2 zusammengefasst [Sut12] und wurden in kondensierter Form auch bereits erfolgreich veröffentlicht [Roennau et al., 2013b]. Keine der Engines erfüllt alle Anforderungen. Aufgrund der numerischen Approximation und der groben Approximation vieler physikalischer Effekte weisen alle Engines sogar starke Defizite auf. *Bullet* erfüllt im Vergleich zu den anderen die meisten Kriterien, insbesondere die wichtigen Reibungskriterien und wurde folglich als Engine für die Simulator-Entwicklung ausgewählt.

Die *Robot and Dynamics Simulation (RoADS)* wurde speziell für die Simulation von mehrbeinigen Laufbewegungen konzipiert. Um die Echtzeitfähigkeit der dynamischen Laufrobotersimulation gewährleisten zu können, können zum einen die verschiedenen Teile wie die Visualisierung und die Roboter Controller auf mehreren, verteilten Rechnern (Hosts) ausgeführt werden. Zum anderen wurde bei der Abstraktion der kinematischen Modelle darauf geachtet wesentliche physikalische Effekte zu erhalten und dennoch eine Abstraktion der komplexen Konstruktion zu ermöglichen. Um die Modularität und Anpassbarkeit zu gewährleisten werden die Controller und GUI Elemente über Plug-Ins in das System integriert. In der Abbildung 5.21 ist die Software-Architektur von *RoADS* dargestellt. Die Integration der Physik-Engine *Bullet* in die Gesamtarchitektur ist in der Abbildung 5.21 als *Physics Engine Plugin* dargestellt und im Detail in der Abbildung 5.23 zu sehen.

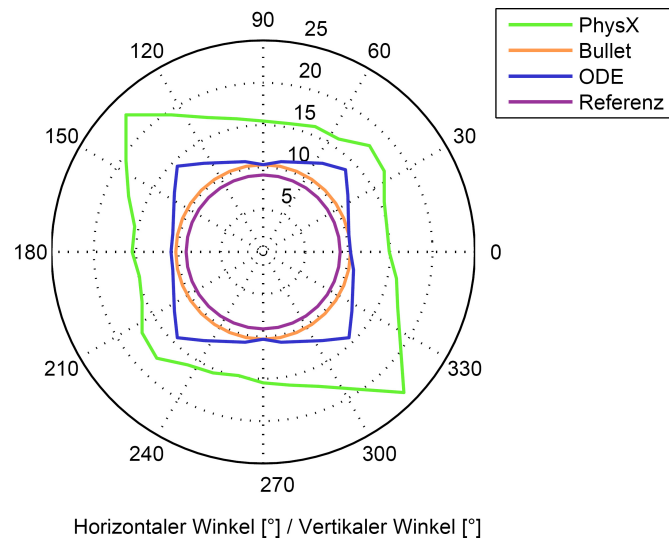
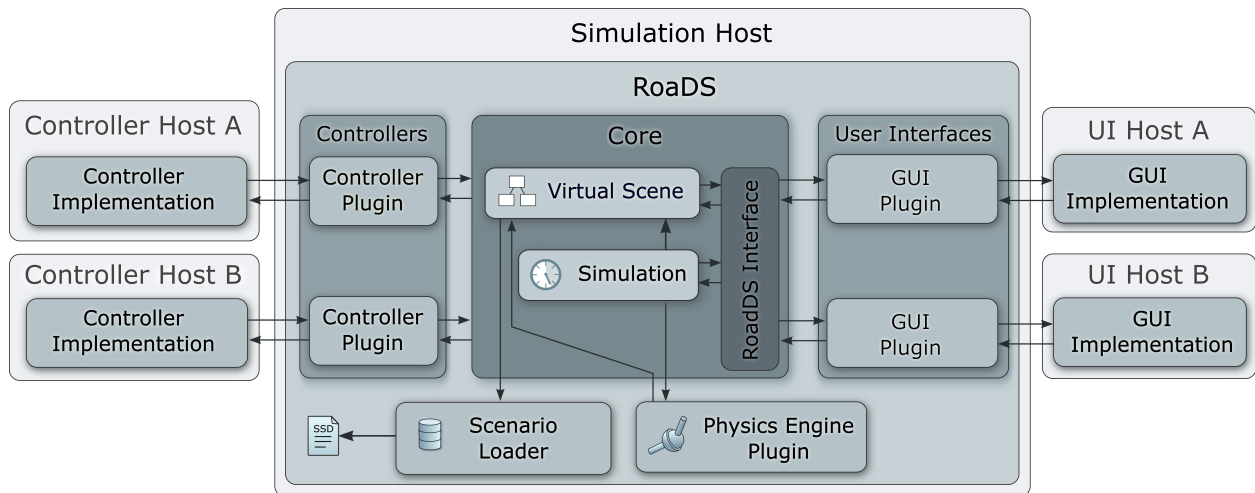


Bild 5.20.: Reibungsmodell: Verwendete Reibungsmodelle im Vergleich zur Referenz, dem Coulombschen Reibungsmodell. Quelle (modifiziert) [Sut12]

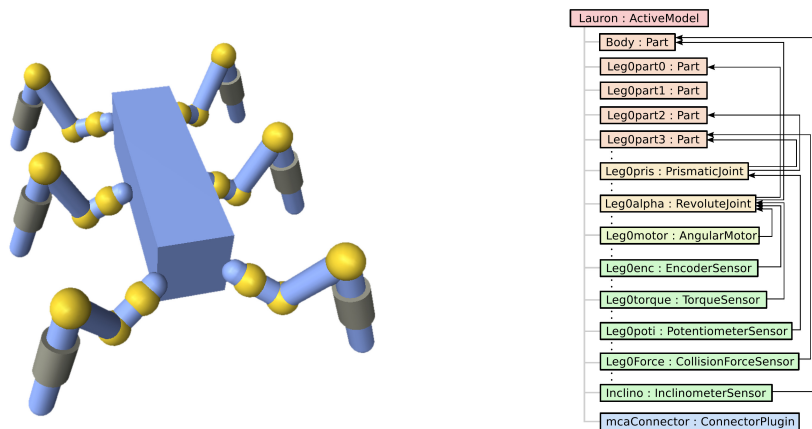
| Virtuelle Experimente | Bullet | ODE | PhysX |
|---|--------|-----|-------|
| A) Lösung der Differentialgleichungen für lineare Beschleunigungen | ○ | ○ | ○ |
| B) Lösung der Differentialgleichungen für rotatorische Beschleunigungen | ○ | ○ | ○ |
| C) Kollisionen mit hoher Geschwindigkeit | ○ | ○ | + |
| D) Kollisionen mit multiplen Kontakten | ○ | - | ○ |
| E) Kollisionen mit trianguliertem Mesh | - | - | + |
| F) Kollisionen bei statischer Stabilität | ○ | - | + |
| G) Kombinierte Kollisionsgeometrien | + | - | ○ |
| H) Statische Reibung | + | + | - |
| I) Unabhängigkeit von Größe und Gewicht | + | + | + |
| J) Approximation des statischen Reibungskegels | + | - | - |
| K) Modellierung der dynamischen Reibung | ○ | ○ | ○ |
| L) Nachgiebigkeit (Restitution) | - | ○ | ○ |
| M) Einhalten von Zwangsbedingungen (Translation) | ○ | ○ | ○ |
| N) Einhalten von Zwangsbedingungen (Rotation) | - | + | - |
| O) Einhalten von Zwangsbedingungen (Laufroboter) | + | ○ | ○ |
| P) Energieerhaltung (Pendel) | ○ | ○ | - |
| Q) Kombiniertes Experiment: Schlupf | + | ○ | - |
| R) Kombiniertes Experiment: Statische Stabilität | + | - | ○ |

Tabelle 5.2.: Vergleich der drei Physik-Engines in zahlreichen virtuellen Experimenten: alle drei Physik-Engines zeigen Schwächen. Insgesamt konnte *Bullet* am ehesten überzeugen. Bewertung: -:= schwach, ○:= normal, +:= gut. Quelle (modifiziert) [Sut12]

Die Echtzeitfähigkeit wird dadurch erreicht, dass sehr viele parallele Threads verwendet werden um den Roboter und die Szene zu simulieren. Im Gegensatz zu Simulationsumgebungen wie Gazebo, können sogar mehrere sechsbeinige Laufroboter mit bis zu 1000 Hz parallel simuliert werden. Links in der Abbildung 5.22 ist das Modell eines sechsbeinigen Laufroboters dargestellt wie es in *RoadS* verwendet wird. Der Roboter ist aus einfachen Grundkörpern aufgebaut. So entstehen keine Schwierigkeiten mit den Kollisionserkennungseigenschaften der Physik-Engine *Bullet* und es wird die Echtzeitfähigkeit der Simulation unterstützt. Im rechten Teil der Abbildung 5.22 ist die hierarchische Struktur eines ActiveModels in *RoadS* am Beispiel des Laufroboters dargestellt. Die Simulation basiert auf PassiveModels, ActiveModels und StaticModels, die wiederum aus verschiedenen Komponenten aufgebaut werden. Ein ActiveModel ist ein Roboter mit Sensoren und Aktoren. Außerdem kann sich ein ActiveModel in der Simulation frei bewegen, also die eige-

Bild 5.21.: *RoaDS* Software-Gesamtarchitektur. Quelle (modifiziert) [Sut12]

ne Position und Orientierung verändern. Ein *PassiveModel* verhält sich ähnlich wie ein *ActiveModel*, besitzt jedoch keine Sensoren, die Daten liefern können, noch Aktoren die von außen angesteuert werden können. Das *StaticModel* ist Teil der Umgebung und kann sich nicht bewegen oder verändert werden. Um die dynamischen Eigenschaften des Roboters in dem abstrahierten, vereinfachten *ActiveModel* berücksichtigen zu können, werden die relevanten dynamischen Kenngrößen wie Lage des Schwerpunktes, Gewicht und Trägheitstensor aus den realen CAD extrahiert.

Bild 5.22.: Abstrahiertes Laufrobotermodell in *RoaDS*: (links) Visualisierung eines sechsbeinigen Laufroboters, (rechts) Darstellung des ActiveModels eines sechsbeinigen Laufroboters. Quelle (modifiziert) [Sut12]

In der Abbildung 5.23 ist detailliert dargestellt wie die Physik-Engine *Bullet* in *RoaDS* eingebunden ist. *RoaDS* besitzt zwei Zwischenschichten, die *PhysicsWorld* und *PhysicsSystem*. Durch diese Abstraktionsschichten wird es in Zukunft einfacher neue Versionen von *Bullet* oder auch anderen Physik-Engines in *RoaDS* einzubinden. Weiter ist in der Abbildung 5.23 zu erkennen wie verschiedenen Elemente des Active-Models in *Bullet* simuliert werden können.

Insbesondere die Kontaktkräfte in den Füßen können in *Bullet* nicht direkt erfasst werden. Jedoch erlaubt die Physik-Engine alle an einer Kollision beteiligten Punkte in einem bestimmten Bereich zu erfassen. *RoaDS* prüft, ob Kollisionspunkte im Bereich der Füße vorliegen und summiert die auf die Einzelpunkte

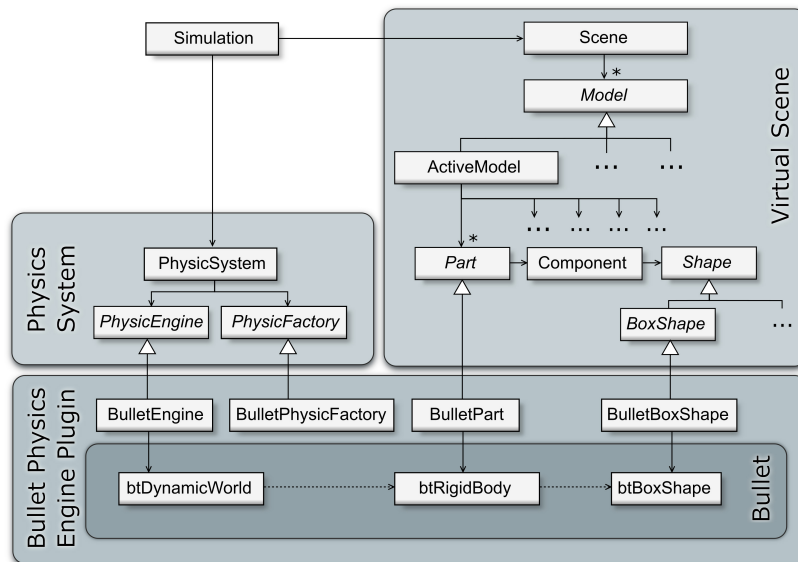


Bild 5.23.: Integration der *Bullet* Physik-Engine in die *RoadS* Simulationsumgebung. Quelle (modifiziert) [Sut12]

einwirkenden Kräfte. Die Gesamtsumme der Kräfte wird anschließend als Bodenkontaktkraft in *RoadS* zur Verfügung gestellt. Die meisten anderen Sensoren wie z.B. der Lagesensor können direkt aus geometrischen Eigenschaften der Grundkörper gegenüber den Weltkoordinaten hergeleitet werden. Wie in der Abbildung 5.21 zu erkennen ist, verfügt *RoadS* auch über eine klare 3D-Darstellung, die ebenfalls als Plug-In implementiert wurde. Insbesondere die Visualisierung ist eine rechenintensive Teilfunktion, die zwar für den praktischen Einsatz sowie das Debugging sehr wichtig ist, jedoch sollte diese die eigentliche Simulationsleistung nicht beeinflussen. Die Trennung der OpenGL basierte Visualisierung von der Physik-Engine ist ein wichtiges Konzept, das dazu beiträgt effizient simulieren zu können. In der Abbildung 5.24 sind zwei Szenen in *RoadS* dargestellt. Links in der Abbildung ist eine Treppe zu erkennen, die genutzt werden kann um zu evaluieren, welche Arten von Hindernissen mit einer bestimmten Kinematik überwunden werden können (z.B. in Abhängigkeit der Stufenbreite und Höhe). Im rechten Teil der Abbildung ist eine Hängebrücke zu sehen, die nachgibt, wenn der Roboter über diese läuft. Dies ist ein Beispiel dafür wie *RoadS* auch dynamische Umgebungen mit zusätzlichen, beweglichen Elementen simulieren kann.

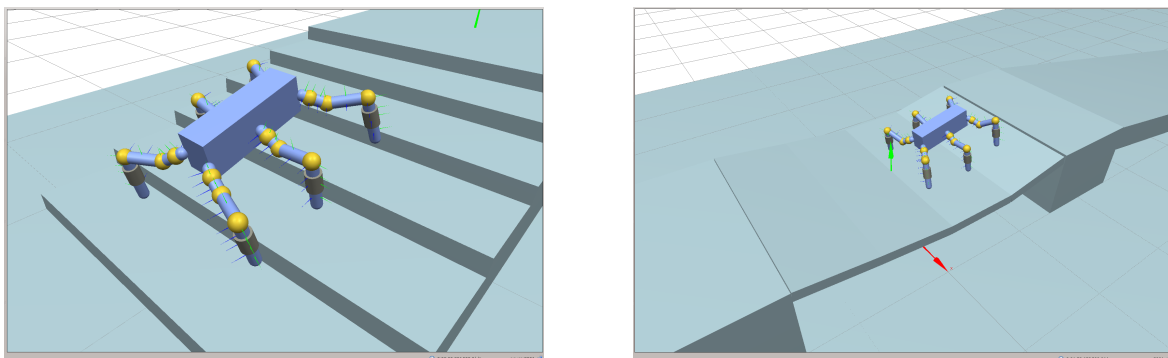


Bild 5.24.: *RoadS*: Simulierter, sechsbeiniger Laufroboter: (links) Laufroboter auf Treppe. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2015]; (rechts) in der Umgebung können auch bewegliche Elemente integriert werden, wie z.B. eine Hängebrücke. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2015]

Die entwickelte Simulationsumgebung *RoadS* ist ein wichtiges Analysewerkzeug, das es erlaubt verschiedene Laufroboter zu simulieren, zu untersuchen und zielgerichtet weiterzuentwickeln. Im Gegensatz

zu anderen Simulatoren kann *RoaDS* einen mehrbeinigen Laufroboter auch in einer komplexen Umgebung in Echtzeit simulieren und liefert gleichzeitig wichtige Informationen über das System. Die virtuellen Drehmomente, Bodenkontaktkräfte sowie viele weitere virtuelle Sensordaten ermöglichen detaillierte Analysen der Lokomotion. Wichtig ist auch, dass virtuelle Versuche unter stets gleichbleibenden Bedingungen wiederholt werden können und so statistisch relevante Untersuchungen durchgeführt werden können. Außerdem können in der Simulationsumgebung auch gefährliche für den Roboter ansonsten sehr riskante Experimente durchgeführt werden.

5.3.2. Integrierte Online-Simulation

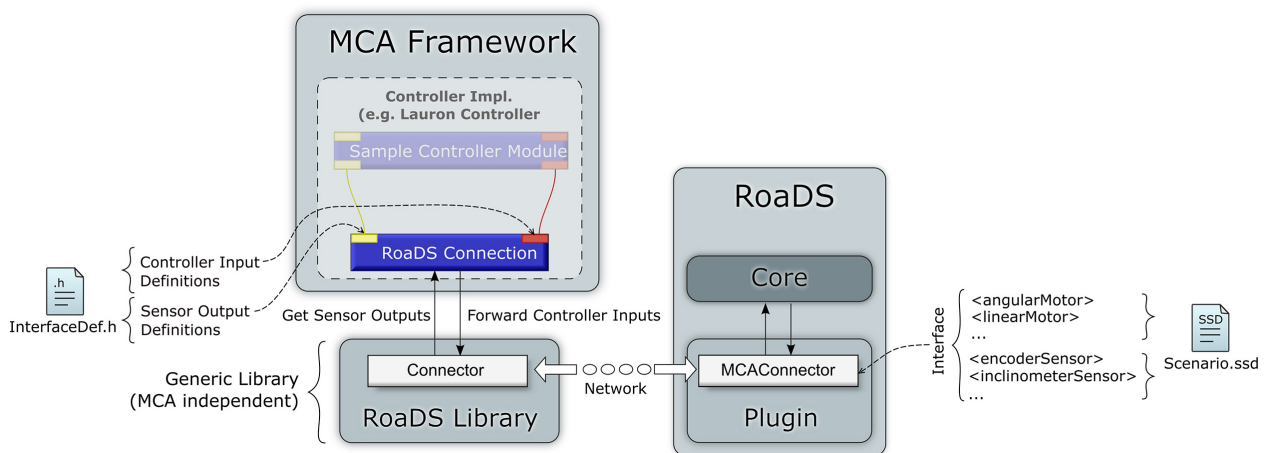


Bild 5.25.: Kommunikation zwischen *RoaDS* und *MCA2* ist einfach und effizient. Quelle (modifiziert) [Sut12]

Bei der Entwicklung von *RoaDS* wurde stark darauf geachtet, dass die Simulation sich transparent mit dem Roboter verbinden lässt [Roennau et al., 2015] [Sut12]. Hierfür wurde in dem *MCA2-Framework*, welches auf dem Roboter *LAURON V* zur Ausführung der verhaltensbasierten Steuerung eingesetzt wird, ein spezielles Modul entwickelt, das alle Sensordaten aus *RoaDS* empfängt, aber auch die Schnittstellen zu den Aktoren zur Verfügung stellt. In der Abbildung 5.25 ist dargestellt wie die Kommunikation zwischen dem Roboter-Framework und *RoaDS* umgesetzt wurde. Im Fall von *LAURON IVc* und *LAURON V* handelt es sich um eine *MCA2*-Schnittstelle. Eine generische C++ Bibliothek erlaubt es schnell und einfach andere Roboter mit den jeweiligen Software-Frameworks an *RoaDS* anzubinden. Durch die Netzwerktransparenz ist es möglich die Simulation mit Livedaten des Roboters zu auszuführen, aber auch virtuelle Sensordaten aus der Simulation dem echten Roboter zur Verfügung zu stellen. Nur durch die gute Echtzeitfähigkeit ist es möglich einfach zwischen der realen und virtuellen Welt Daten auszutauschen.

In der Abbildung 5.26 ist ein Experiment dargestellt, bei dem der Laufroboter *LAURON IVc* auf der Stelle läuft. Die realen Gelenkwinkelinformationen werden live in *RoaDS* eingelesen. Das virtuelle dynamische Modell bewegt sich somit synchron zum realen Roboter.

Die integrierte Online-Simulation ist eine wichtige Erweiterung der dynamischen Simulationsumgebung *RoaDS*. Sie erlaubt es reale Lokomotionsdaten in die Simulation zu integrieren und dort die erweiterten dynamischen Analysemethoden zu nutzen. Neben Belastungsdaten (Drehmomente und Bodenkontaktkräfte) kann auch der gemessene Stromverbrauch zu den virtuellen Drehmomenten korreliert werden und ggf.

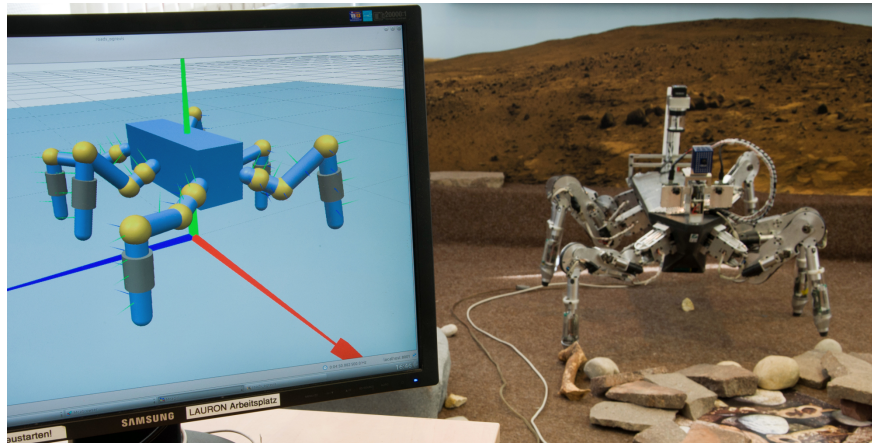


Bild 5.26.: Parallele Dynamische Simulation: die realen Gelenkwinkel des Roboters *LAURON IVc* werden direkt von der Simulation verwendet. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2015]

Probleme in der Mechanik (z.B. erhöhte Reibung in einem Gelenk) schnell identifiziert werden [Sut12]. Die gute Echtzeitfähigkeit und direkte Integration von *RoadS* erlauben es das System parallel als virtuellen Sensor zu nutzen um interne Zusammenhänge eines realen Roboters zu untersuchen. Zudem kann das entwickelte Analysewerkzeug auch als System zur Optimierung der Laufroboterfähigkeiten verwendet werden. Das Vorgehen bei der Konzipierung und Umsetzung der integrierten Online-Simulation wurden auch bereits erfolgreich veröffentlicht [Roennau et al., 2015].

5.4. Diskussion

Die empirischen Analysen erlauben es ebenso wie die kinematischen Analysen einen bestehenden Laufroboter systematisch zu untersuchen, aber auch während der Konzeptionsphase den Entwicklungsprozess zu begleiten. Neben diesen beiden Ansätzen stellt die entwickelte, dynamische Simulationsumgebung *RoadS* ein wichtiges Werkzeug dar, welches für tiefergehende Untersuchungen verwendet werden kann. In diesem Abschnitt sollen vor allem die Vor- und Nachteile der verschiedenen Analysemethoden und Werkzeuge diskutiert werden. Dabei unterscheiden sich die Konzepte der Analysen so deutlich, dass die Beurteilung unabhängig voneinander erfolgt.

Empirische Analysen Ein großer Vorteil der empirischen Analysen liegt darin, dass sie durch die verwendete Messtechnik objektiv und eindeutig sind. Jedoch kann der messtechnische Aufwand hoch sein bzw. die notwendige Messtechnik teuer oder rauschanfällig. Die Fußpunkte sind eine der wichtigsten Kenngrößen, die zur Analyse verwendet werden, da sie die Basis für viele Metriken bilden. Jedoch ist der exakte Bodenkontakt z.T. gar nicht so einfach messtechnisch zu erfassen. Neben der kinematischen Rückrechnung entstehen vor allem Fehler und Ungenauigkeiten durch elastische, federnde Elemente am Fuß sowie Schlupf auf weichem, nachgiebigem Untergrund. Der Energieverbrauch kann präzise und eindeutig über eine Strommessung ermittelt werden. Oft ist aus diesen Strömen auch eine Berechnung der resultierenden Drehmomente möglich (z.B. bei Gleichstrommotoren kann ein direkter linearer Zusammenhang hergeleitet werden). Um die Motorströme jedoch mit einer hohen Abtastrate sowie guten Auflösung erfassen zu können, muss zusätzliche Messtechnik in die Leistungselektronik integriert werden. Der veränderliche Schwerpunkt eines Laufroboters lässt sich anhand der Kinematik sowie aller dynamischen Parameter mathematisch eindeutig ermitteln. Der Schwerpunkt ist neben den Fußpunkten eine der wichtigsten Größen, da dieser für alle

Stabilitätsmetriken benötigt wird. Auch wenn die kontinuierliche Bestimmung des Schwerpunkts mathematisch einfach ist, ist der initiale Aufwand ein detailliertes, hochwertiges Dynamikmodell zu erstellen hoch. Von der Güte dieses Modells hängt die Güte des ermittelten Schwerpunkts ab. Die präzise Erfassung der Laufgeschwindigkeit benötigt entweder ein spezielles Bewegungsmodell (Odometrie¹) oder externe Messtechnik. Der Nachteil an dem Bewegungsmodell ist, dass Schlupf nur unzureichend erfasst werden kann und somit die ermittelte Distanz je nach Untergrund ungenau wird. Besser sind externe Messsysteme, die korrekte Geschwindigkeitsmessungen ermöglichen. Diese Systeme sind jedoch oft teuer und müssen aufwändig eingerichtet werden. Alternativ kann eine durchschnittliche Geschwindigkeit über eine Distanz und manuelle Zeitmessung ermittelt werden. Messtechnisch am schwierigsten zu erfassen sind externe und interne Kräfte. Anhand dieser Kräfte kann ermittelt werden wie stark ein System belastet ist. Bei dynamischen Stabilitätsmetriken werden diese Kräfte und Momente berücksichtigt und sind somit für schnelle, dynamische Laufroboter besonders wichtig. Einige dieser Kräfte lassen sich über Gelenkwinkelgeschwindigkeiten und Beschleunigen mit Hilfe des Dynamikmodells herleiten. Andere, insbesondere externe Kräfte können nur über aufwändige, teure Fußsensoren oder Kraftmessdosen ermittelt werden. Alle vorgestellten, empirischen Analysen bilden die Basis für die entwickelten modellbasierten Metriken. Höhere Kosten oder Aufwände um bessere Messergebnisse in diesem Bereich ermitteln zu können, skalieren direkt mit der Leistungsfähigkeit eines Laufroboters. Nur mit präzisen Analysen kann die Leistung systematisch optimiert werden.

Kinematische Analyse Das Potential eines Laufroboters kann durch kinematische Analyse systematisch besser zugänglich gemacht werden. Im Gegenzug sind die Analysen aufwändig und benötigen tiefgehendes Verständnis um die Ergebnisse auch richtig interpretieren zu können. Die systematische Arbeitsraumanalyse eines Laufroboterbeins bietet eine Möglichkeit die Bewegungspotentiale bewerten zu können. Die Abtastung im Gelenkwinkelraum und Rückrechnung in den kartesischen Raum bietet eine effiziente Möglichkeit geometrische Körper und Formen zu erzeugen, die den Arbeitsraum definieren. Die Interpretation dieser Körper kann aufgrund ihrer komplexen Form schwierig sein. Schnitte durch die Arbeitsräume vereinfachen die Interpretation und erlauben es z.B. systematisch *Schrittweiten* zu optimieren. Nachteilig bei der Abtastung im Gelenkwinkelraum ist die resultierende, nicht äquidistante Abtastung im kartesischen Raum. So können Fehlinterpretationen in dünn besetzten Bereichen entstehen, die eine sorgfältige Betrachtung notwendig machen. Die Analyse der Geschwindigkeitspotentiale im Arbeitsraum nach *Yoshikawa*[235] erweitert die Arbeitsraumanalyse dahingehend, dass nicht nur die Erreichbarkeit, sondern auch die Güte der Erreichbarkeit untersucht wird. Die aus dieser Analyse resultierenden Geschwindigkeitsellipsoide müssen im 3D-Arbeitsraum dargestellt werden, was die Interpretation schwierig macht. Eine Normierung der Ellipsoide und Abbildung als Farbwert reduziert zusammen mit den Schnitten durch den Arbeitsraum die Komplexität. Was die Analyse der Geschwindigkeitspotentiale nicht berücksichtigt ist, dass durch die unterschiedlich langen Hebelarme bei gleicher Leistung der Motoren unterschiedliche Kräfte auf den Untergrund übertragen werden können. So ermöglicht die *Yoshikawa*-Analyse keine Optimierung der Gelenkmomente, was ggf. zu einer Überlastung führen könnte. Ein Ansatz die hebelarmabhängigen Belastungen mit zu berücksichtigen wäre die Methode der Konditionalzahlen[186]. Diese nutzt die Inverse der Jakobimatrix und betrachtet die Kraft am Ende einer kinematischen Kette explizit. Andererseits zeigen Untersuchungen von biologischen Systemen, dass Insekten und Tiere ihre Bewegungstrajektorien vor allem in Bereichen guter Manipulierbarkeit nach *Yoshikawa* ausführen[235]. Dies stützt die Annahme, dass dort die kinematisch op-

¹Odometrie: Konzept zur Messung der zurückgelegten Strecke anhand der Beinbewegungen

timalen Bereiche vorliegen und bildet auch die Basis dafür die Geschwindigkeitsellipsoide in dieser Arbeit zur erweiterten Arbeitsraumanalyse zu verwenden. Die interaktiven Bewegungstrajektorien sind zum einen ein Werkzeug um schnell die Bewegungstrajektorie während der Schwingbewegung anzupassen. Zum anderen bietet dieses Werkzeug die Möglichkeit diese Trajektorie systematisch und iterativ zu optimieren. Durch die eindeutige, klare mathematische Definition der drei Beziérkurven können nahezu beliebige Trajektorienformen verwendet werden. Im Gegensatz zu sehr einfachen rechteckigen oder sinusförmigen Bewegungstrajektorien sind hierfür jedoch mehr Parameter notwendig, die mit Bedacht gewählt bzw. verändert werden müssen. Die kinematischen Analysen unterstützen den Entwickler dabei systematisch die Fähigkeiten des Roboters kinematisch weiterzuentwickeln. Weiter können diese dazu verwendet werden neue Kinematiken zu untersuchen und zu bewerten.

Dynamische Analysewerkzeuge Dynamische Simulationsumgebungen ermöglichen reproduzierbare Bedingungen und die Möglichkeit systematisch die Fähigkeiten von Laufrobotern weiterzuentwickeln. Außerdem kann ein mehrbeiniger Laufroboter in der Simulation besonders stark belastet werden, ohne direkt teure, arbeitsaufwändige Schäden hervorzurufen. Weiter erlaubt eine Dynamiksimulation auch den Blick ins Innere des Roboters, so dass ansonsten nicht erfassbare Drehmomente und Kräfte einfach und zugleich präzise untersucht werden können. Allerdings weichen die Ergebnisse aus Simulationsumgebungen immer noch von den Ergebnissen realer Messreihen ab. Insbesondere Laufroboter stellen hohe Anforderungen an die Physik-Engine, da z.B. die Reibung eine zentrale, wichtige Rolle spielt, die den Schlupf beim Laufen unmittelbar beeinflusst. In dieser Arbeit wurde unter Abwägung der Anforderungen und einer Auswahl von hochwertigen Physik-Engines die *RoaDS* Simulationsumgebung für mehrbeinige Laufroboter entwickelt. *RoaDS* bildet die Basis um mehrbeinige Laufroboter in schwierigen, virtuellen Umgebungen systematisch testen und weiterentwickeln zu können. Trotz großer Sorgfalt weicht jedoch auch diese Simulation von der Realität ab, so dass nicht gänzlich auf reale Experimente verzichtet werden kann. Die direkte Integration von *RoaDS* in das Robotersteuerungsframework *MCA2*, mit dem auch *LAURON IVc* und *LAURON V* gesteuert werden, erlaubt eine direkte parallele Integration und Ausführung (digitaler Zwilling). So können reale Messdaten live in der Simulation verwendet werden um das Dynamik-Modell anzusteuern und zwischen dem realen und virtuellen System zu vergleichen. Die dynamischen Analysewerkzeuge runden die Methoden und Verfahren ab und bieten eine wertvolle Unterstützung bei der Bewertung und Optimierung mehrbeiniger Laufroboter.

Die entwickelten Analyseverfahren verbessern nachhaltig das Verständnis von mehrbeinigen Laufrobotern. Sie machen viele interne Prozesse und Zusammenhänge sichtbar und bilden die Basis für die systematische Weiterentwicklung und Optimierung von Laufrobotern. Damit leistet die entwickelten Analysen einen grundlegenden, wichtigen Beitrag für die Forschung im Bereich mehrbeiniger Laufroboter.

6. Optimierung von mehrbeinigen Laufvorgängen

Die Analyse und Bewertung mehrbeiniger Laufvorgänge bildet die Basis um einen Laufroboter zu verstehen und diesen mit anderen Systemen vergleichen zu können. Für die zielgerichtete Optimierung werden im nächsten Schritt Methoden und Verfahren benötigt, die die identifizierten Defizite adressieren können. In diesem Kapitel werden konkreten Verfahren und Werkzeuge vorgestellt, die dazu verwendet werden können, mehrbeinige Laufroboter systematisch und systemunabhängig zu optimieren. Dabei wird auf die drei Bereiche Stabilität, Geschwindigkeit und Energieeffizienz detailliert eingegangen. Die Abbildung 6.1 zeigt beispielhaft die Anwendung eines stochastischen Optimierungsverfahrens (Partikel-Schwarm-Optimierer) um die redundante Kinematik eines Laufroboters gezielt anzusteuern und so die Leistungsfähigkeit zu steigern.

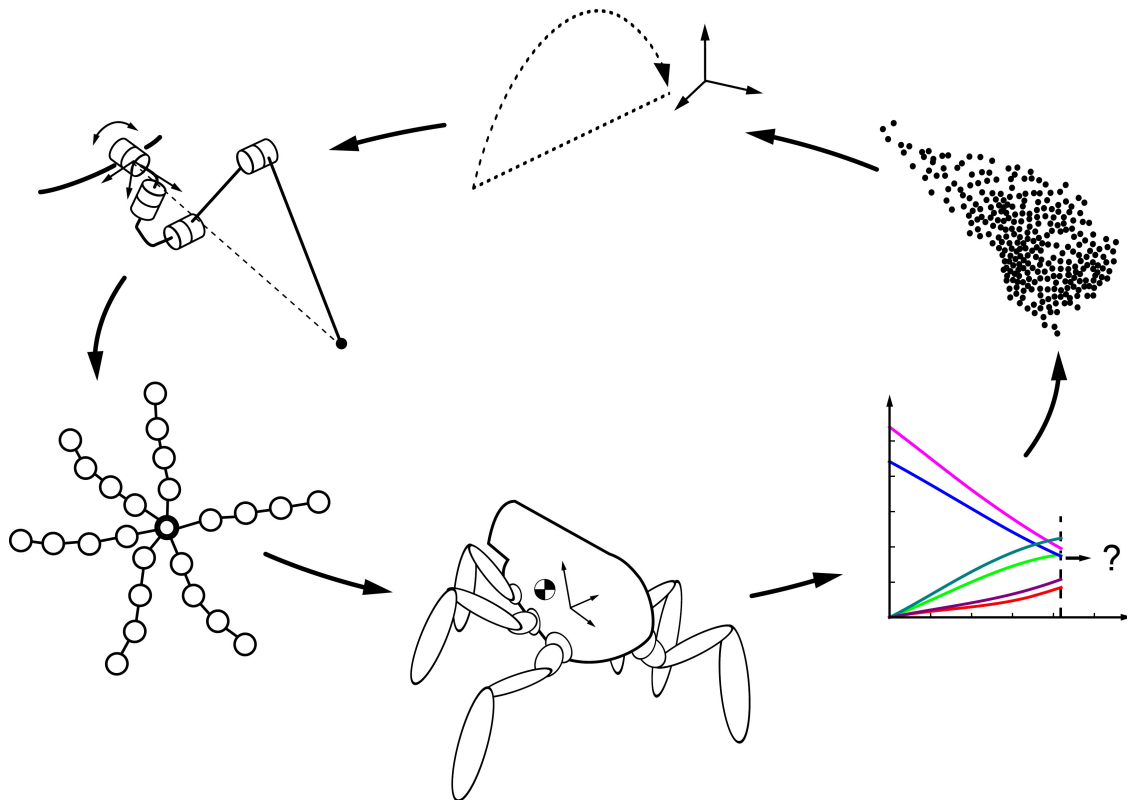


Bild 6.1.: Systematische Optimierung der Fähigkeiten und Eigenschaften von mehrbeinigen Laufrobotern. Quelle [Sch14]

6.1. Optimierung der Stabilität

Bei einem Sturz oder einer Kollision eines Laufroboters können schnell schwere Schäden an der Mechanik oder Sensorik entstehen. Außerdem können sich die meisten Roboter nach einem Sturz nicht selbst wieder aufrichten. Für eine reale Anwendung wäre ein Sturz des Roboters somit gleichbedeutend mit dem Ende der

Mission. Im folgenden Abschnitt werden Methoden und Verfahren vorgestellt um die Kinematik hinsichtlich der Stabilität zu optimieren. Weiter werden Konzepte zur Verbesserung der Stabilität beim Laufen und Klettern hergeleitet. Abschließend wird ein Optimierungsverfahren entwickelt, das es erlaubt die kinematischen Redundanzen während des Laufens intelligent zu nutzen.

6.1.1. Kinematische Optimierung der Stabilität

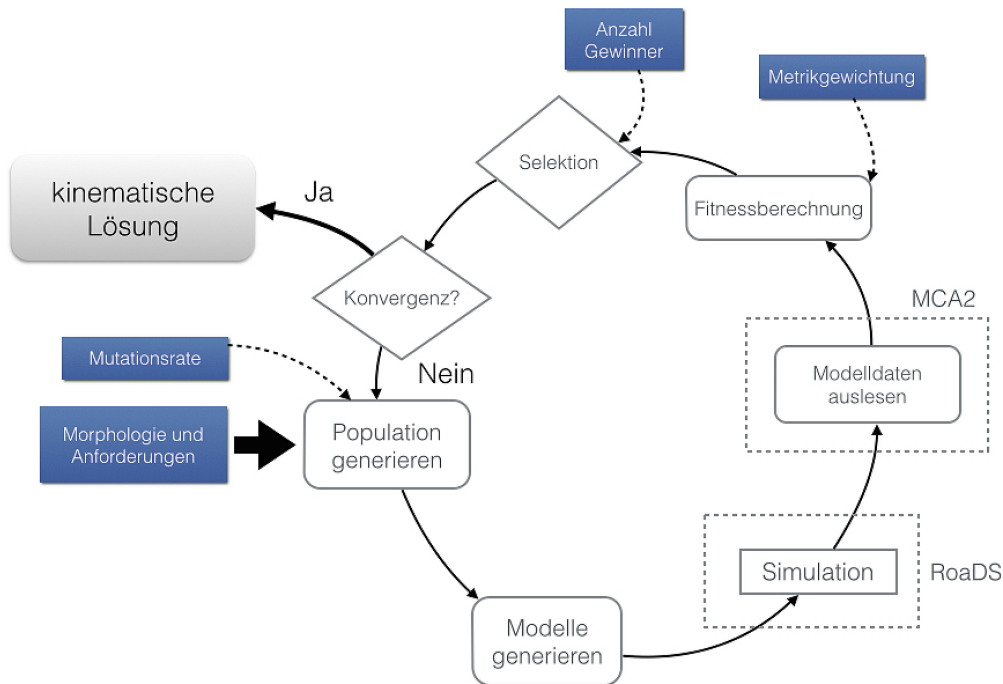


Bild 6.2.: Konzept der kinematischen Optimierung mit evolutionärem Algorithmus. Quelle [Bü15]

Die Entwicklung einer mehrbeinigen Laufroboterkinematik ist eine komplexe Aufgabe, die zahlreichen Randbedingungen unterliegt. Unter anderem bestimmt der Einsatzzweck bzw. das Einsatzszenario maßgeblich, welche Eigenschaften und Fähigkeiten das System bereitstellen muss. Um die Entwickler von Laufrobotern zu unterstützen wurde ein genetischer Kinematik-Optimierer entwickelt, der drei verschiedene Morphologien unterstützt [Bü15]. Zu Beginn der Optimierung muss der Laufroboter-Typus gewählt werden: eine insekten-, reptilien- oder säugetierartige Morphologie. Die Vorauswahl ist notwendig, da ansonsten der Optimierungsraum zu groß wird und eine Konvergenz nicht mehr sichergestellt werden kann. Die grundlegenden Unterschiede dieser drei Morphologien wurden bereits in Kapitel 2 diskutiert. Weiter kann über die Anforderungen bzw. die dazugehörige Fitnessfunktion Einfluss auf den Optimierer genommen werden. Der Einfluss der Schrittweite, Stabilität, Belastung der Gelenke (Momente) und Massen kann individuell angepasst werden. In der Abbildung 6.2 ist das Konzept der genetischen Optimierung visualisiert. Nach Auswahl des morphologischen Typs (Insekt, Reptil, Säugetier) und einer Mutationsrate wird eine initiale Population von kinematischen Modellen (Individuen) erzeugt. Die Mutationsrate beeinflusst wie neue Nachkommen (neue kinematische Modelle) erzeugt werden. Der genetische Algorithmus verwendet Mutations-, Cross-Over und Zufallsoperationen um neue Lösungen zu erzeugen. Aus der aktuellen Population an kinematischen Modellen werden konkrete Modelle für die *RoaDS* Simulationsumgebung erstellt. Die Eigenschaften und Fitness dieser Modelle werden mit Hilfe des MCA2 Softwareframeworks ausgelesen bewertet. Anschließend werden die besten Modelle ausgewählt (Selektion) und geprüft, ob diese bereits

die Abbruchbedingungen erfüllen. Falls dies nicht der Fall ist, wird eine neue Population erzeugt. Dieser iterative Prozess läuft in der Regel bis zu 100 Mal ab, bis die kinematischen Modelle zu einem Optimum konvergieren. In der Abbildung 6.3 ist der Verlauf dieser Optimierung anhand eines Beispiels zu erkennen. Für eine anschaulichere Darstellung wurde die Fitnessfunktion auf den Wertebereich $[0;1]$ normiert.

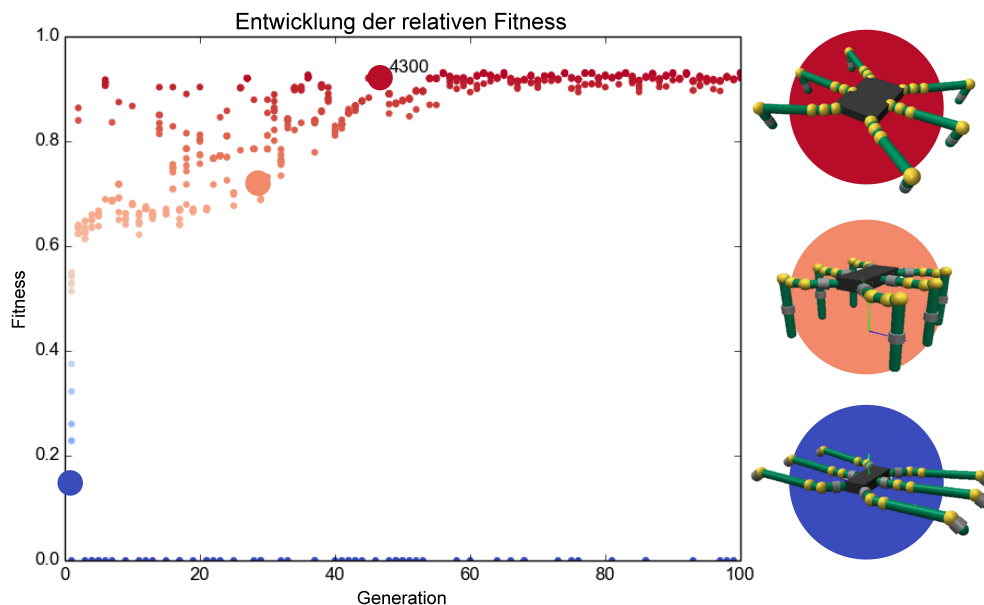


Bild 6.3.: Verlauf der kinematischen Optimierung eines sechsbeinigen, insektenartigen Systems mit ausgewählten Lösungen. Quelle [Büttner et al., 2016]

In der Abbildung 6.3 ist die Optimierung einer insektenartigen Morphologie mit Zwischenergebnisse zu Beginn (blau), Mitte (orange) und Ende (rot) der Evolution zu sehen. Der genetische Algorithmus arbeitet mit modellbasiertem Vorwissen um den potentiellen Lösungsraum einzuschränken und die Konvergenz zu beschleunigen. Um eine gute Konvergenz zu erreichen und die Probleme mit lokalen Minima bei der Optimierung zu adressieren werden die Werte für die Mutation und Rekombination automatisch zur Laufzeit angepasst. Der genetische Optimierer findet so stets sehr gute Lösungen, die bei gleichbleibenden Anforderungen auch stets zu den gleichen Lösungen konvergieren. In der Abbildung 6.4 sind die besten kinematischen Modelle für alle drei Morphologien dargestellt. Diese drei Morphologien können auch untereinander

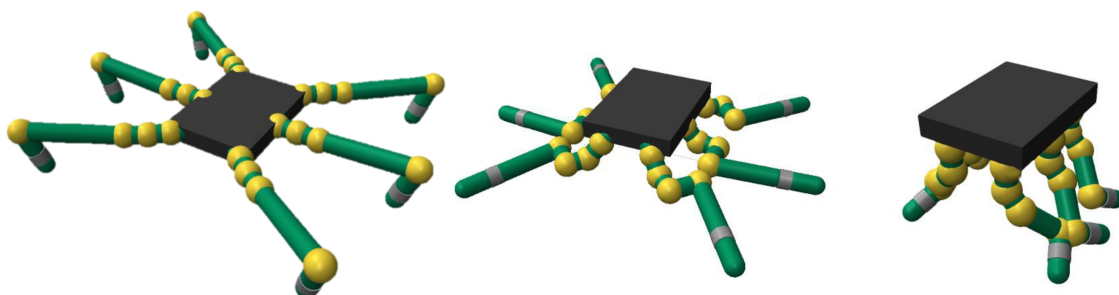


Bild 6.4.: Ergebnisse der genetischen Optimierung: (links) insektenartige Kinematik, (mittig) reptilienartige Kinematik, (rechts) säugetierartige Kinematik. Quelle [Bü15]

zu vergleichen. In der Tabelle 6.1 sind die Eigenschaften der in Abb. 6.4 gezeigten Modell beschrieben.

Die genetische Optimierung der Kinematik erzeugt gute Lösungen, die natürlichen Kinematiken sehr ähnlich sind. Diese Konvergenz zu natürlichen Lösungen bestätigt die hohe Qualität des entwickelten Op-

| | insektenartig | reptilienartig | säugetierartig |
|-------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Masse | 4645 | 4420 | 3362 |
| Stabilität | 5080 | 7460 | 552 |
| Schrittweite | 1,7 | 1,5 | 1,8 |
| Haltemomente Beta | 11400 | 817 | 1847 |

Tabelle 6.1.: Ergebnisse der genetischen Optimierung: je kleiner die Masse und Haltemomente desto besser, je größer die Stabilität und *Schrittweite* desto besser. Werte nur für relativen Vergleich, entsprechen keiner SI-Einheit. Quelle (modifiziert) [Bü15]

timierers. Das Verfahren erlaubt es schnell und effizient neue Laufroboter zu entwickeln oder verschiedene Morphologien für einen gezielten Einsatzzweck zu bewerten. Insbesondere ist es so möglich die Stabilität des Laufroboters als dominierenden Faktor in der Fitnessfunktion aufzunehmen und so extrem stabile Kinematiken zu entwickeln.

6.1.2. Optimierung der Lokomotion zur Steigerung der Stabilität

Neben kinematischen Anpassungen lässt sich vor allem die Lokomotion über verschiedene Ansätze hinsichtlich der Stabilität verbessern. Reaktive Verhalten können die Stabilität des Roboters sicherstellen. Auch stochastische Optimierungsverfahren können dafür verwendet werden die vorhandene Redundanzen des Roboters so zu nutzen, dass sich die Stabilität in besonders schwierigem Gelände erhöht. Im Folgenden werden die entwickelten Verfahren im Detail vorgestellt.

Verbesserte Stabilität am Hang Um die Stabilität eines Laufroboters stets gewährleisten zu können, müssen vor allem die Höhe des Körpers über dem Boden, die Position des Zentralkörpers relativ zu den Bodenkontaktpunkten und die Neigung des Körpers zur Bodenkontaktebene bzw. Schwerkraft überwacht werden. *LAURON V* verfügt über eine verhaltensbasierte Steuerung, die ein dezentrales, aber reaktives Steuerungsparadigma umsetzt. Die Entwicklung dieser reaktiven Basissteuerung wurden bereits erfolgreich auf der CLAWAR, einer Fachkonferenz für Laufroboterforschung, veröffentlicht [Kerscher et al., 2008a]. Drei schnelle, unabhängige Verhalten überwachen die Höhe, Position und Orientierung des Zentralkörpers. In der Abbildung 6.5 sind die drei Verhalten zusammen mit den lokalen Beinverhalten dargestellt. Die lokalen Verhalten erzeugen zum einen die Basis Schwing- und Stembewegungen, zum anderen stellen diese sicher, dass die Beine während der Stemmphase stets den Bodenkontakt halten (Ground Contact Reflex) und während der Schwingphase auf Kollisionen reagiert (Collision Reflex). Diese spezielle Erweiterung dieser Verhalten wurden auf der renommierten IEEE IROS Fachkonferenz veröffentlicht [Roennau et al., 2014d]. Zusammen erzeugen die Verhalten eine stabile Lokomotion, die auch ohne Wissen über die Umgebung in schwierigem Gelände sicher laufen kann. Die verhaltensbasierte Steuerung verleiht *LAURON Vic* und *LAURON V* einen hohen Grad an Autonomie, auch ohne komplexe Planungsverfahren und detaillierte Umweltmodelle. Die Haltungskontroll-Verhalten wurden für *LAURON V* so erweitert, dass die neuen DELTA-Gelenke (siehe Abschnitt 3.6) insbesondere zum Überwinden großer Steigungen optimal eingesetzt werden können [Roennau et al., 2014d]. Die DELTA-Gelenke werden vom Inclino-Verhalten so angesteuert, dass die ALPHA-Gelenke an einem Hang nur minimal durch die Gravitation belastet werden. Hierzu wird der Hilfswinkel PSI eingeführt, der die Neigung der Beine zur Oberfläche der Aufstandsfläche definiert. In der Abbildung 6.6 ist die Anstellung der Gelenke und der Winkel PSI anschaulich dargestellt. Die Verwendung der DELTA-Gelenke um den Winkel PSI aktiv zu beeinflussen verbessert die Stabilität am Hang erheblich.

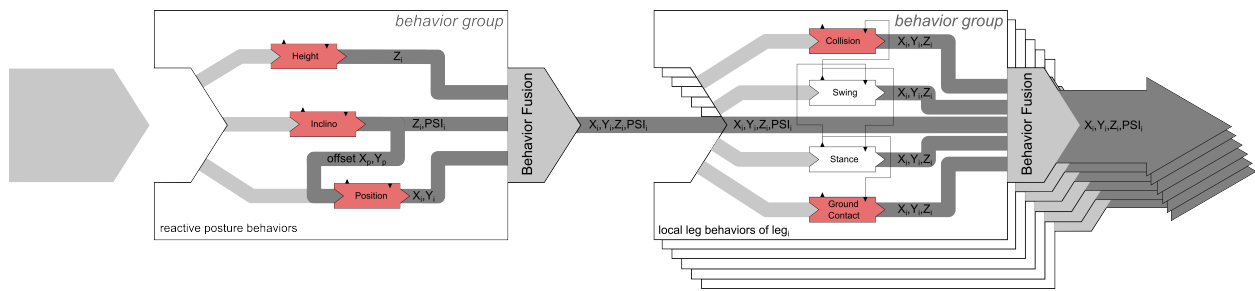


Bild 6.5.: Auszug aus verhaltensbasierter Robotersteuerung: im linken Teil sind die drei Haltungskontrollverhalten und im rechten Teil die lokalen Beinverhalten dargestellt. Quelle [Roennau et al., 2014d]

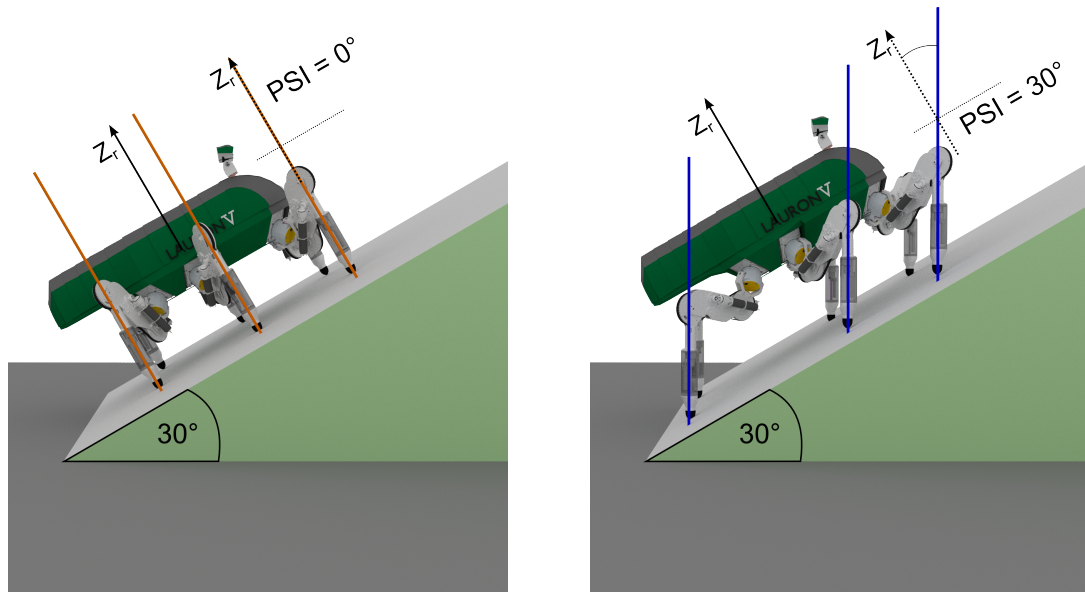


Bild 6.6.: Laufroboter *LAURON V* am Hang: (links) ohne Anpassung des PSI Winkels, (rechts) mit Anpassung an die Neigung und Entlastung der ALPHA-Gelenke. Quelle [Roennau et al., 2014d]

Außerdem wurden zwei weitere Funktionen in das Inclino-Verhalten integriert, die das Überwinden von großen Steigungen verbessert. Ab einer bestimmten Neigung wird ein Positionsoffset erzeugt und der Roboter schiebt den Schwerpunkt in Richtung des Hangs. Zudem passt das Inclino-Verhalten die Orientierung des Körpers an den Hang an. Dabei folgt die Neigung des Körpers jedoch nicht der Neigung des Hangs, sondern bildet den Mittelwert aus der Neigung des Hangs (erkannt über die Neigung der Aufstandsfläche) und dem Gravitationsvektor. Die erweiterten, reaktiven Roboterverhalten konnten die Stabilität am Hang deutlich verbessern. In der Abbildung 6.7 ist die Auswertung verschiedener Experimente zur Evaluation der Stabilität am Hang dargestellt.

Der Roboter hat während der Experiment mit allen 6 Beinen stets Bodenkontakt am Hang. Die Steigung des Hangs wird langsam auf 20° erhöht. Nach 10 Sekunden wird die Steigung nochmals erhöht bis diese 30° erreicht. Das Experiment wird insgesamt mit vier verschiedenen Konfigurationen wiederholt. Die Konfigurationen sind in der Tabelle 6.2 beschrieben. Bei jeder Konfiguration wurden verschiedene Teile der Haltungskontrollverhalten aktiviert und deaktiviert. Die beste Stabilität erreicht *LAURON V* mit *Config 4*, bei der alle Verhalten vollständig aktiviert sind. Zur Veranschaulichung sind *Config 1* und *Config 3* in der Abbildung 6.8 ebenfalls dargestellt.

Die reaktiven Haltungskontrollverhalten sind sehr gut dazu geeignet die Stabilität eines mehrbeinigen

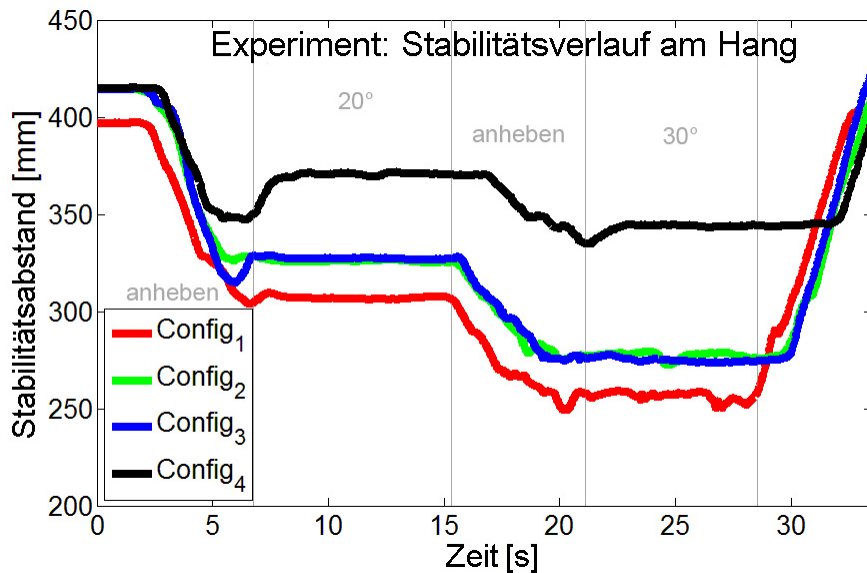


Bild 6.7.: Verlauf der Stabilität bei Experimenten an veränderlichem Hang. Quelle [Roennau et al., 2014d]

| Config | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------|---|---|---|---|
| DELTA aktiv | x | ✓ | ✓ | ✓ |
| Höhenverhalten aktiv | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| An Hang anlehnen aktiv | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| DELTA an Hang anpassen aktiv | x | x | ✓ | ✓ |
| Positionsverhalten aktiv | x | x | x | ✓ |

Tabelle 6.2.: Konfigurationen der vier Stabilitätsversuche am Hang.

Laufroboters zu erhöhen. Insbesondere die Nutzung der kinematischen Redundanz, die Definition des Winkels PSI und die Anpassungen an den Hang, verbessern die Kletterfähigkeiten und Stabilität des Laufroboter LAURON V deutlich. Die guten Lauf- und Klettereigenschaften konnten nicht nur im Labor, sondern auch erfolgreichen beim DLR SpaceBot Cup 2015 Wettbewerb in einer Wettkampfarena mit rauem und z.T. steilem Gelände unter Beweis gestellt werden.

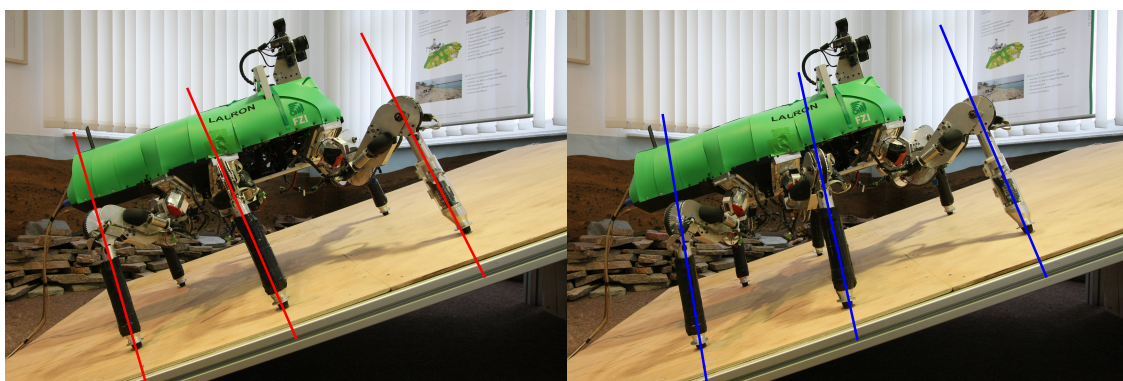


Bild 6.8.: Laufroboter LAURON V an adaptiven Hang: (links) in der Config 1, (rechts) in der Config 3. Quelle [Roennau et al., 2014d]

Verbesserte Stabilität beim Laufen Viele mehrbeinige Laufroboter weisen Redundanzen in der Kinematik auf, die dazu verwendet werden können um die Lokomotion anzupassen bzw. zu optimieren. Die Sta-

bilität und der Energieverbrauch eines sechsbeinigen Laufroboters können mit Hilfe der verfügbaren, kinematischen Redundanzen verbessert werden. Hierfür wurde ein stochastischer Partikel-Schwarm-Optimierer (PSO) entwickelt, der in der Lage ist die Gelenkwinkel hinsichtlich verschiedener Gütefunktionen im Stand, aber auch während der Laufbewegung zu optimieren [Sch14]. In der Abbildung 6.9 ist das Konzept des PSO anschaulich dargestellt. Im ersten Schritt werden Soll-Beintrajektorien mit kartesischen Koordinaten von der

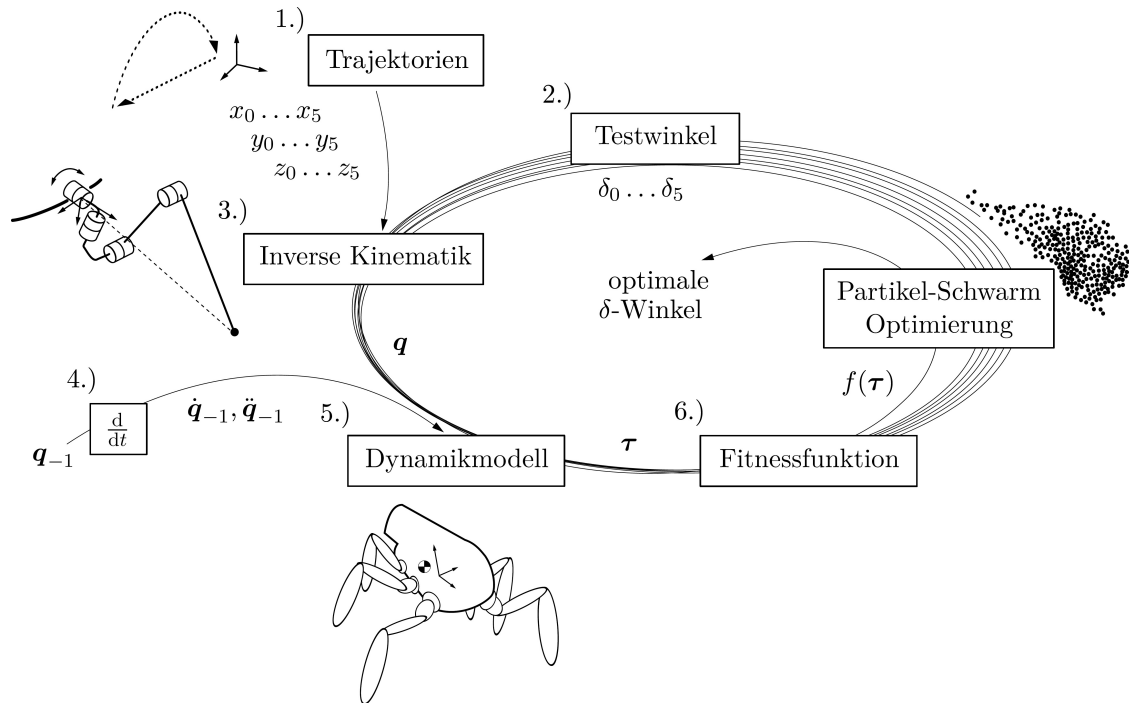


Bild 6.9.: Konzept des Partikel-Schwarm-Optimierers: gezielter Einsatz der kinematischen Redundanz um die Stabilität beim Laufen zu verbessern. Mit x,y,z den Koordinaten der Bewegungstrajektorie, den Gelenkwinkeln q , den Drehmomenten τ , der Fitnessfunktion $f(\tau)$ sowie den zu optimierenden DELTA Gelenkwinkeln δ . Quelle [Sch14]

Robotersteuerung erzeugt. Diese werden zusammen mit den zu optimierenden Testwinkeln einer speziell für den PSO entwickelten inversen Kinematik übergeben, die es erlaubt eine Lösung für die verbleibenden Winkel zu berechnen. Im vierten Schritt werden die berechneten Gelenkwinkel differenziert um Gelenkwinkelgeschwindigkeiten und Gelenkwinkelbeschleunigungen zu erhalten. Da es sich bei den Gelenkwinkeln um diskrete Werte handelt, wird ein Savitzky-Golay-Filter verwendet um möglichst glatte, stetige Ableitungen bestimmen zu können. Die Gelenkwinkel q , Gelenkwinkelgeschwindigkeiten \dot{q} und Gelenkwinkelbeschleunigungen \ddot{q} werden dann dem entwickelten Dynamikmodell als Eingangsgrößen übergeben. Das Dynamikmodell wurde als Floating-Base System entwickelt, und benötigt neben diesen Eingabegrößen nur noch Informationen darüber welche Füße gerade Bodenkontakt haben. Das Modell besteht aus einer unabhängigen Schätzung der Bodenkontaktkräfte, einer detaillierten kinematisch korrekten Baumstruktur aller beweglichen Elemente sowie einem Verfahren zur rekursiven Berechnung der aktuellen Gelenkmomente. Im sechsten Schritt bewertet eine Fitnessfunktion auf Basis dieser Gelenkmomente die aktuellen Testwinkel und passt die Testwinkel im Schwarm an. Der Partikel-Schwarm-Optimierer berechnet zwischen zwei Gelenkwinkel-Kommandos bis zu 100 Iterationen dieser Testwinkel um die gewünschte Fitnessfunktion zu optimieren. Das Konzept lässt sich einfach auf beliebige andere mehrbeinige Roboter übertragen und erlaubt es über die Fitnessfunktion verschiedene Eigenschaften des Roboters dynamisch anzupassen.

6. Optimierung von mehrbeinigen Laufvorgängen

In der Abbildung 6.10 ist ein Experiment mit dem Laufroboter *LAURON V* dargestellt, bei dem der Roboter über ein schwieriges Hindernis klettern muss. Der PSO wurde so eingestellt, dass dieser die ALPHA-Gelenk Momente minimiert (siehe Abbildung 3.15). Die ALPHA-Gelenke sind besonders beim Überwinden von Hindernissen und Steigungen stark belastet. Die Überlast dieser Gelenke kann dazu führen, dass *LAURON* ein Hindernis nicht überwinden kann, da nicht ausreichend Vorschub mehr möglich ist. Die

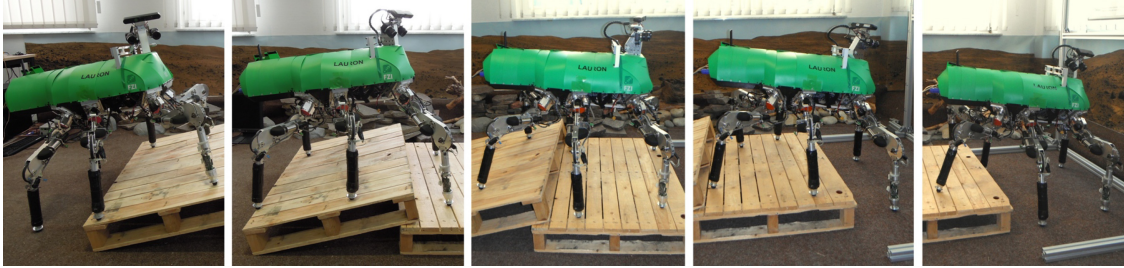


Bild 6.10.: Laufroboter *LAURON V* überwindet Hindernis bei Versuchen mit dem Partikel-Schwarm-Optimierer. Quelle [Sch14]

DELTA-Gelenke werden vom PSO so angesteuert, dass die ALPHA-Gelenke möglichst wenig Gravitationskräfte aufnehmen müssen. Der Partikel-Schwarm-Optimierer war in der Lage *LAURON* deutlich schnell über das Hindernis laufen zu lassen (siehe Abbildung 6.11). Die rote Kurve in dieser Abbildung (ohne PSO) liegt zudem stets oberhalb der grünen Kurve (mit PSO). Somit konnte der PSO nicht nur die Zeit verkürzen, die der Roboter braucht um das Hindernis zu überwinden, sondern auch die aktuelle Leistungsaufnahme insgesamt reduzieren. Außerdem war der Abstand zum Aufstandspolygon, dies entspricht der Definition

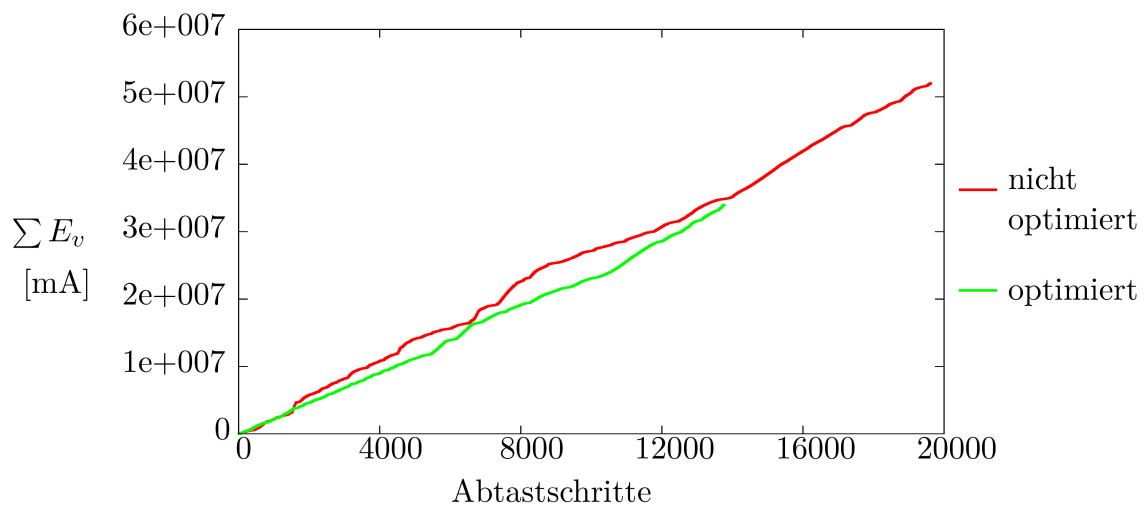


Bild 6.11.: Energieverbrauch E_v beim Überwinden des Hindernisses: (rote Kurve) vor der Optimierung, (grüne Kurve) schnelleres Überwinden des Hindernisses nach der Optimierung. Quelle [Sch14]

der Static Stability Margin (SSM), mit dem Einsatz des PSO deutlich höher. In der Abbildung 6.12 ist zu erkennen, dass stets ein Stabilitätsabstand von ca. 40mm eingehalten werden kann (grüne Kurve).

Die gezielte Verwendung von kinematischen Redundanzen hat großes Potential die Laufleistung von mehrbeinigen Laufrobotern zu steigern. Der entwickelte Partikel-Schwarm-Optimierer erlaubt es die Redundanzen der *LAURON V* Kinematik intelligent zu nutzen und Eigenschaften des Roboters gezielt anzupassen. Interessanterweise verbessert sich bei der Optimierung der Stabilität gleichzeitig auch der Energieverbrauch, da zum einen Hindernisse schneller, aber auch effizienter überwunden werden können. Der PSO bietet ei-

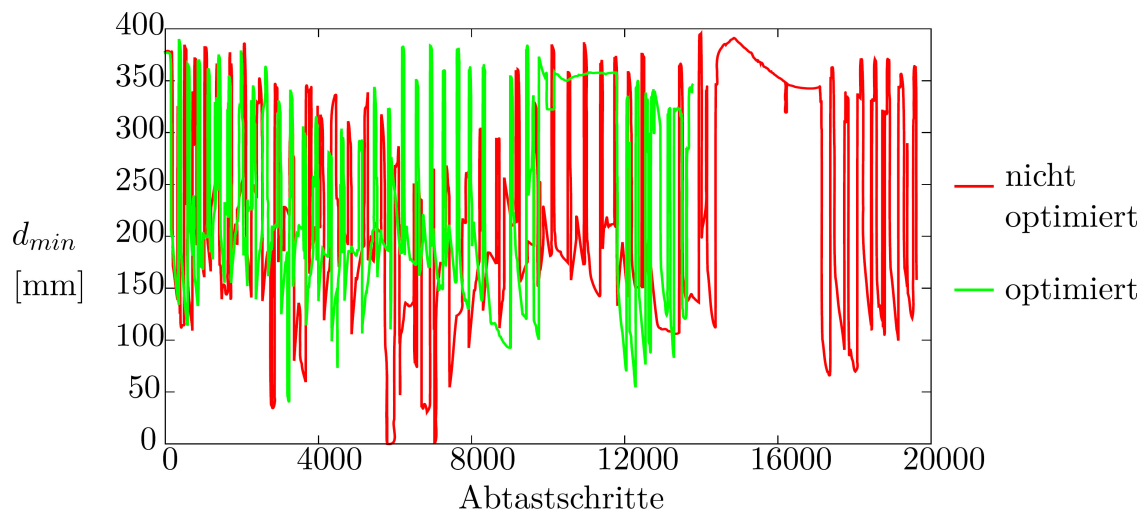


Bild 6.12.: Stabilitätsreserve d_{min} beim Überwinden des Hindernisses: (rote Kurve) vor der Optimierung mit zweifachem Verlust der Stabilität, (grüne Kurve) Stabilitätsreserve von mindestens 40mm bleibt stets erhalten, Hindernis wird schneller überwunden. Quelle [Sch14]

ne hohe notwendige Flexibilität die Laufbewegung online jederzeit anzupassen und ist somit ein wichtiges Verfahren um die Fähigkeiten mehrbeiniger Laufroboter systematisch zu verbessern.

6.2. Optimierung der Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit von Laufrobotern ist eine wichtige Leistungskenngröße, da Laufroboter stets mit rad- oder kettengetriebenen Systemen verglichen werden. Insbesondere um ihre Einsatzchancen in realen Anwendungen zu verbessern, ist es essentiell die Geschwindigkeit zu erhöhen. In diesem Abschnitt werden neu entwickelte Verfahren und Methoden vorgestellt, die die kinematische Auslegung aber auch die Lokomotionsparameter anpassen um die Laufgeschwindigkeit zu steigern.

6.2.1. Kinematische Optimierung der Geschwindigkeit

Bei der Konzeption eines Laufroboters werden wichtige Entscheidungen getroffen, die die Laufgeschwindigkeit maßgeblich beeinflussen. Vor allem die Auslegung der Kinematik sowie Aktorik entscheiden über die maximal mögliche *Schrittweite* sowie die Dauer eines Schwing-Stemm-Zyklus. Die maximal mögliche Schrittweite kann optimiert werden, indem der Arbeitsraum der Kinematik analysiert und die Schwing- und Stemmtrajektorien entsprechend angepasst werden. Nach der Konzeption der Bein kinematik sollte auch die Anbringung der Beine am Zentralkörper betrachtet werden [Roennau et al., 2013a][Koc10]. Viele Laufroboter nutzen eine zum Körper orthogonale oder parallele Anbringung der Beine. In der Natur kann jedoch beobachtet werden, dass die Beine z.B. bei der Stabheuschrecke über verschiedene Anstellwinkel mit dem Zentralkörper verbunden sind. In der Abbildung 6.13 ist zu erkennen wie die Beine mit einem ROLL-Winkel Ψ zum Zentralkörper geneigt werden können. Der angegebene Winkel von $\Psi = 20^\circ$ ist hier nur ein Beispiel um den möglichen ROLL-Anstellwinkel sichtbar zu machen. Die zweite Möglichkeit das Bein gegenüber dem Zentralkörper in einem Winkel anzustellen ist in der Abbildung 6.14 dargestellt. Hier wird beispielhaft ein YAW-Anstellwinkel von $\eta = \pm 30^\circ$ für die Vorder- und Hinterbeine gezeigt. In dieser Arbeit wurde bei der Konzeption des Laufroboters *LAURON V* intensiv untersucht, wie die Anstellwinkel am besten zu wählen sind um die *Schrittweiten* zu optimieren [Roennau et al., 2013a]. Dabei wurden Schnitte durch den

6. Optimierung von mehrbeinigen Laufvorgängen

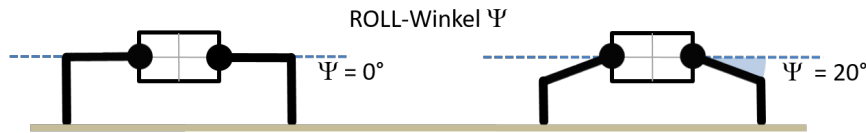


Bild 6.13.: Konzept der ROLL-Anstellwinkel Ψ der Beine gegenüber Zentralkörper: Winkel kann verändert werden um den Arbeitsraum zu optimieren. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2013a]

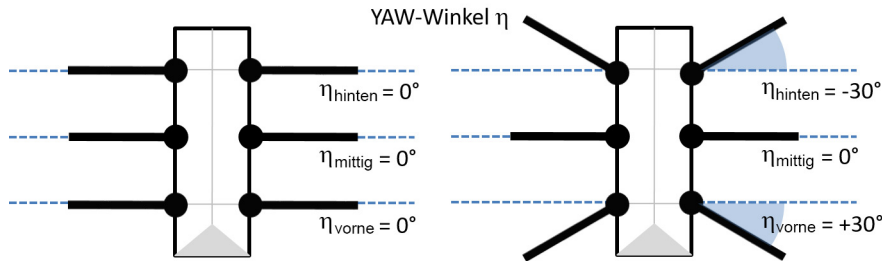


Bild 6.14.: Konzept der YAW-Anstellwinkel η der Beine gegenüber Zentralkörper: Winkel kann verändert werden um den Arbeitsraum zu optimieren. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2013a]

Yoshikawa-Arbeitsraum verwendet um diesen genauer zu analysieren (siehe auch Arbeitsraumanalysen im Kapitel 5). Nur Bereiche mit einer guten, normierten *Manipulierbarkeit* mit $w \geq 0,7$ wurden bei der Optimierung berücksichtigt. In diesen guten Bereichen sollen die Schwing- und Stemmtrajektorien liegen. In der Abbildung 6.15 sind drei Schnitte mit den längsten, technisch sinnvollen *Schrittweiten* (schwarze Linien) im Arbeitsraum bei einer Laufhöhe von 100mm dargestellt [Koc10]. Dabei wird das Bein links (a) um $\Psi = 30^\circ$, mittig (b) um $\Psi = 45^\circ$ und rechts (c) um $\Psi = 60^\circ$ angewinkelt. In allen Plots der Abbildung 6.15 beträgt der YAW-Anstellwinkel $\eta = \pm 90^\circ$. Die rote Linie ist jeweils das rechtwinklige Lot auf die möglichen *Schrittweiten* (schwarze Linien). Weitere Untersuchungen bei jeweils 200mm und 300mm Abstand

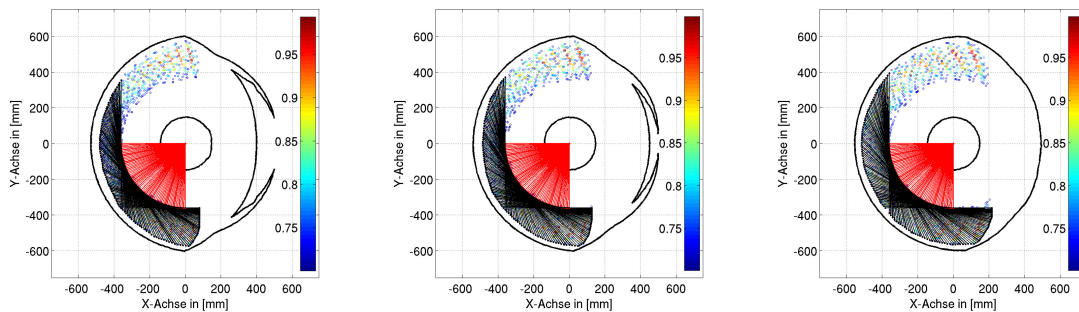


Bild 6.15.: Schrittweitenoptimierung bei 100mm Abstand zum Untergrund mit verschiedenen ROLL-Anstellwinkeln Ψ . (links) $\Psi = 30^\circ$, (mittig) $\Psi = 45^\circ$, (rechts) $\Psi = 60^\circ$. Farblich codiert ist der Wert der normierten Manipulierbarkeit w , schwarze Linien sind die evaluierten Schrittweiten, rote Linien sind die orthogonalen Tangenten zu den Schrittweiten durch den Ursprung. Quelle [Koc10]

zum Untergrund zeigen, dass der Anstellwinkel großen Einfluss auf die *Schrittweite* hat (siehe Abbildungen 6.16 und 6.17). Im Allgemeinen ermöglichen für *LAURON V* größerer Anstellwinkel Ψ auch größere *Schrittweiten* (siehe Tabelle 6.3). Somit ist es vorteilhaft zu versuchen den ROLL-Anstellwinkel so groß wie möglich zu wählen um die Geschwindigkeit zu erhöhen. Weitere Optimierungen und Analysen begrenzen jedoch den Anstellwinkel. Neben der Geschwindigkeit spielt auch die Flexibilität eine entscheidende Rolle. Bei einem Winkel von $\Psi = 45^\circ$ weisen die *Schrittweiten* die größte Bandbreite auf. Diese Bandbreite ist ein Indikator für die Flexibilität in diesem Bereich des Arbeitsraums. Unter Beachtung der möglichen Schritt-

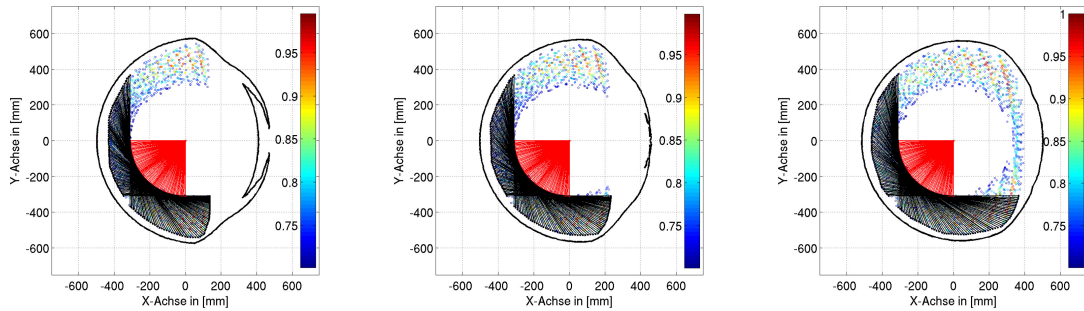


Bild 6.16.: Schrittweitenoptimierung bei 200mm Abstand zum Untergrund mit verschiedenen ROLL-Anstellwinkeln Ψ . (links) $\Psi = 30^\circ$, (mittig) $\Psi = 45^\circ$, (rechts) $\Psi = 60^\circ$. Farblich codiert ist der Wert der normierten Manipulierbarkeit w , schwarze Linien sind die evaluierten Schrittweiten, rote Linien sind die orthogonalen Tangenten zu den Schrittweiten durch den Ursprung. Quelle [Koc10]

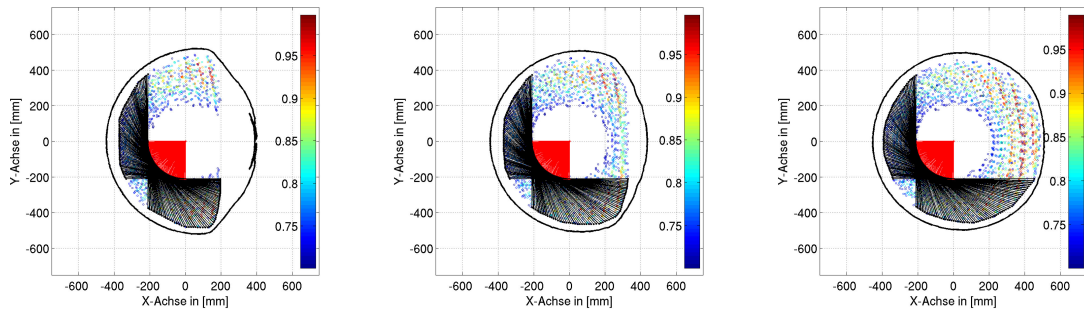


Bild 6.17.: Schrittweitenoptimierung bei 300mm Abstand zum Untergrund mit verschiedenen ROLL-Anstellwinkeln Ψ . (links) $\Psi = 30^\circ$, (mittig) $\Psi = 45^\circ$, (rechts) $\Psi = 60^\circ$. Farblich codiert ist der Wert der normierten Manipulierbarkeit w , schwarze Linien sind die evaluierten Schrittweiten, rote Linien sind die orthogonalen Tangenten zu den Schrittweiten durch den Ursprung. Quelle [Koc10]

| $\Psi = 30^\circ$ | | $\Psi = 45^\circ$ | | $\Psi = 60^\circ$ | |
|-------------------|-----|-------------------|-----|-------------------|-----|
| Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| 262 | 564 | 237 | 558 | 280 | 543 |

Tabelle 6.3.: Übersicht Schrittweitenvergleich in [mm] bei verschiedenen ROLL-Anstellwinkeln Ψ

weiten, Schritthöhen sowie der Flexibilität wurden für *LAURON V* die ROLL-Anstellwinkel in Tabelle 6.4 gewählt. Die aufwändige Optimierung der Anstellwinkel hat letztendlich zu Winkeln geführt hat, die den Winkeln der indischen Stabheuschrecke sehr ähnlich sind. Dies belegt zum einen die Effizienz des Optimierungsansatzes und motiviert zugleich bei der Entwicklung neuer Laufroboter intensiv biologische Vorbilder zu studieren.

| Anstellwinkel | LAURON V | | | Indische Stabheuschrecke | | |
|---------------|----------|-------|--------|--------------------------|-----------|--------|
| | Vorne | Mitte | Hinten | Vorne | Mitte leg | Hinten |
| ROLL Ψ | +45° | +45° | +45° | +40° | +40° | +50° |

Tabelle 6.4.: Vergleich der ROLL-Anstellwinkel für *LAURON V* und die indische Stabheuschrecke [52]

In der kinematischen Optimierung steckt insgesamt viel Potential die Geschwindigkeit eines Laufroboters zu erhöhen. Entsprechend sollte bei der Konzeption, aber auch Weiterentwicklung bestehender Laufroboter die Kinematik als wichtiger Aspekt bei der Erhöhung der Geschwindigkeit berücksichtigt werden. Dieser wichtige Optimierungsansatz wurde bereits erfolgreich veröffentlicht [Roennau et al., 2013a].

6.2.2. Optimierung der Lokomotion zur Steigerung der Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit eines Laufroboters wird maßgeblich von dessen Lokomotionsparametern festgelegt. Oft wird jedoch nicht das volle Potential der Kinematik und Antriebstechnik ausgeschöpft, da viele Lokomotionsparameter nur grob eingestellt werden. So ist die Verwendung einfacher rechteckiger oder halbkreisförmiger Bewegungstrajektorien z.B. weit verbreitet. Vergleicht man diese Trajektorien mit Beispielen aus der Natur, lässt sich viel Optimierungspotential erkennen um z.B. auch die Laufgeschwindigkeit zu erhöhen.

Optimierte Laufmuster Das schnellste Laufmuster für sechsbeinige Laufroboter ist das Tripod-Laufmuster. Die Lastübernahme einer Tripod-Beingruppe zu der anderen ist ein kritischer Zeitpunkt, da in sehr kurzer Zeit große Lasten innerhalb des Systems verschoben werden. Insbesondere der Laufroboter *LAURON IVc* erzeugt bei diesem Lastwechsel Schwingungen, die die Laufgeschwindigkeit reduzieren. Hierzu wurde ein

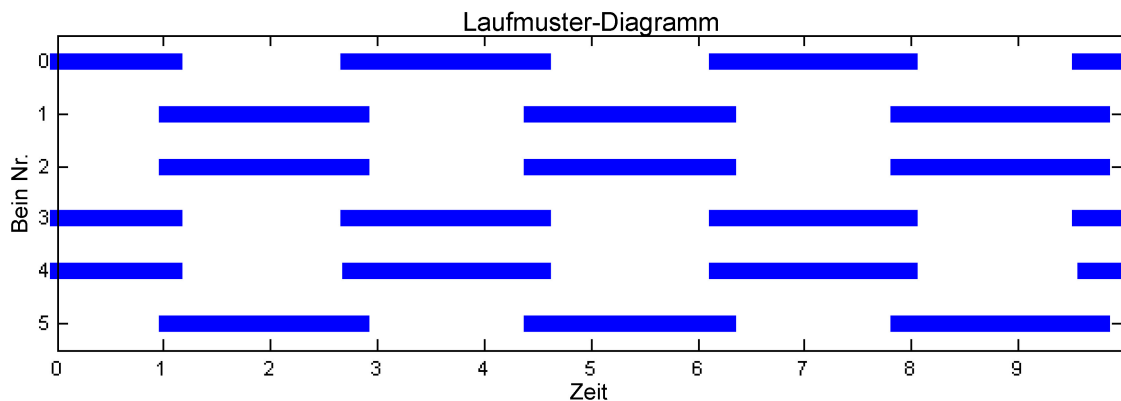


Bild 6.18.: Gait Diagramm des überlappenden, kontinuierlichen Tripod-Laufmusters. Quelle (modifiziert) [Pla15]

überlappendes Tripod-Laufmuster entwickelt, bei dem am Ende der Schwingphase alle sechs Beine eine gemeinsame, überlappende Stemmphase ausführen [Pla15]. Dieses spezielle Laufmuster reduziert vor allem das Zurückschwingen des Körpers und sorgt für eine gleichmäßigere Laufgeschwindigkeit. Das dazugehörige Gait-Diagramm ist in der Abb. 6.18 zu sehen. In der Abbildung 6.19 ist das Zurückschwingen der blauen Kurve nach ca. 14 Sekunden und nach ca. 17 Sekunden gut zu erkennen. Die roten und grünen Kurven zeigen die Laufbewegungen mit dem überlappenden Tripod-Laufmuster. Die Schwingungen sind weiterhin zu erkennen. Jedoch muss an dieser Stelle auf das verhaltensbasierte Sicherheitssystem eingegangen werden. Dieses System überwacht die *Schrittweiten*, Körperneigung und viele weitere Lokomotionsparameter. In der Arbeit konnte gezeigt werden, dass dieses Sicherheitssystem den Laufroboter bremst und z.T. für die Schwingungen des Zentralkörpers verantwortlich ist. So zeigt der grüne Kurvenverlauf des überlappenden *Tripods* ohne Sicherheitssystem die wenigsten Schwingungen und die höchste Geschwindigkeit. Das überlappende Tripod-Laufmuster wurde weiterentwickelt und konnte in zahlreichen Versuchsreihen eine Geschwindigkeitssteigerung von fast 300% erreichen (0,065 m/s gegenüber 0,018 m/s).

Die Optimierung von speziellen Laufmustern zur Geschwindigkeitssteigerung kann stark vom Roboter und dessen Kinematik wie auch Dynamik abhängen. Eine sorgfältige Analyse der Laufgeschwindigkeit kann schnell ungewollte Schwingungen und Bewegungen identifizieren. Mit gezielt angepassten Laufmustern können diese Schwingungen wiederum kompensiert und die Laufgeschwindigkeit signifikant erhöht werden.

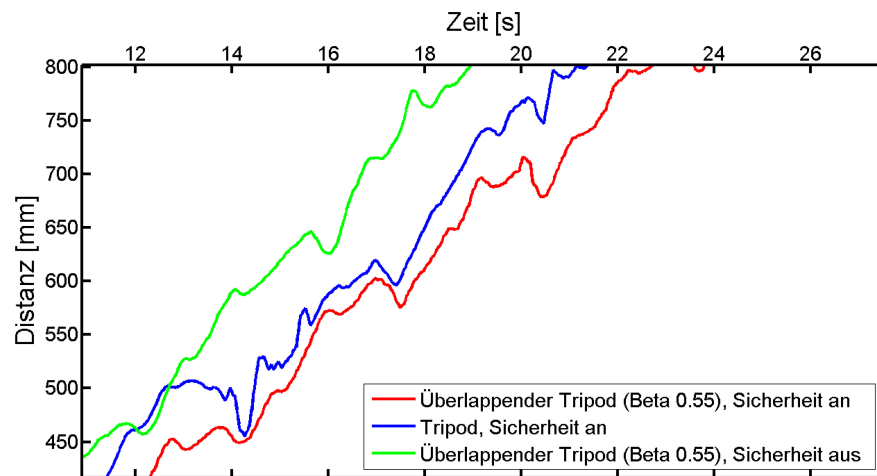


Bild 6.19.: Laufgeschwindigkeit des Laufroboters *LAURON IVc*: (blaue Kurve) unveränderter Tripod mit Sicherheit, (rote Kurve) überlappender Tripod mit Sicherheit, (grüne Kurve) überlappender Tripod ohne Sicherheit. Quelle (modifiziert) [Hep11]

Optimierte Bodenkontaktinformationen Nur wenn zuverlässige Informationen über den Bodenkontakt vorliegen, kann ein Laufroboter auf Hindernisse, Löcher und Spalten reagieren. Außerdem hängt die Stabilität eines mehrbeinigen Laufroboters vor allem von der Aufstandsfläche ab, die durch die Füße mit Bodenkontakt aufgespannt wird. Die zuverlässige Auswertung der Bodenkontaktsensoren ist somit eine wichtige, zentrale Funktion. Allerdings hat die Erfahrung mit den Laufrobotern des FZI, aber auch anderer Forschungsgruppen gezeigt, dass es nicht so einfach ist zuverlässige Bodenkontaktinformationen zu erhalten. Mechanische Kontaktsensoren wie Schalter oder lineare Potentiometer können bei Querkräften leicht verklemmen und müssen vor Dreck sowie Feuchtigkeit zuverlässig geschützt werden. Kraftmessende Sensoren sind in der Regel kostspielig oder empfindlich. Diese kommen mit den hohen Belastungen bei Kollisionen und dem Abrutschen von Hinderniskanten oft nicht über längere Zeit zurecht. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Fusionskonzept für multimodale Fußsensordaten entwickelt, welches geschickt verschiedene Datenquellen zusammen auswerten kann [Hep11]. Die jeweiligen Sensordaten werden zunächst skaliert und dann anhand einer Sigmoid-Funktion mit Hysterese ausgewertet. So ist es möglich verschiedene Schwellen für die Erkennung eines Bodenkontakts bzw. dem Verlust eines Bodenkontakts zu wählen. Das erweiterte Fusionskonzept wurde auf *LAURON IVc* integriert. Neben den Potentiometer-Sensoren wurden zusätzlich die Motorströme ausgewertet. In der Abbildung 6.20 ist zu erkennen, dass die verbesserten Bodenkontaktinformationen zu einem schnelleren Laufen (größere Steigung der Distanzkurven) führen. Dies lässt sich damit erklären, dass die Laufmuster schneller und sauberer von einem Schritt-Zyklus zu dem anderen umschalten. Außerdem reduziert sich der Schlupf und dies verbessert den Vortrieb bei den Stembewegungen.

Bei der Optimierung der Laufgeschwindigkeit sollten stets die Bodenkontaktinformationen berücksichtigt werden. Sie können großen Einfluss auf die Stabilität, den Schlupf sowie ungewollte Schwingungen haben. Eine multimodale Auswertung von verschiedenen Sensordaten kann die Güte der Bodenkontaktinformationen erhöhen. Weiter kann die entwickelte Sigmoid-Auswertung die Qualität der Daten durch adaptive Schwellwerte verbessern. Sowohl die Fusion sowie die Auswertung konnten die Laufleistung des Laufroboters *LAURON IVc* signifikant verbessern und lassen sich einfach auf weitere Laufroboter übertragen.

Optimierte, heterogene Schrittweiten Bei technisch laufenden Systemen sind die Beine in den meisten Fällen kinematisch und mechatronisch identisch aufgebaut. Ebenso werden meist die gleichen, homoge-

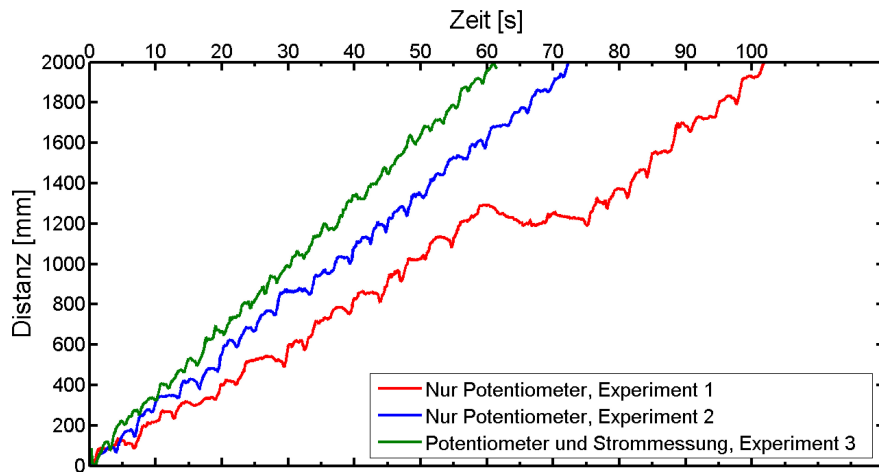


Bild 6.20.: Darstellung der Laufgeschwindigkeit des Laufroboters *LAURON IVc* anhand der zurückgelegten Distanz: (rote Kurve) Experiment mit einfachen Potentiometern als Bodenkontaktinformation, (blaue Kurve) weiteres Experiment mit einfachen Potentiometern als Bodenkontaktinformation, (grüne Kurve) Experiment mit neuer Auswertung und Fusion der Potentiometer-Information und der Motorströme. Quelle (modifiziert) [Hep11]

nen Schrittweiten für alle Beinpaare gewählt. Ein Blick in die Natur zeigt jedoch, dass die Beine dort hochspezialisiert sind und die Beintrajektorien bzw. die *Schrittweiten* nicht homogen sind [52]. Nicht homogene *Schrittweiten* führen beim Laufen zu Verspannungen im Lokomotionsapparat. Dies stellt eine zusätzliche mechanische Belastung dar, die in der Regel von den Entwicklern und Forschern in technischen Systemen minimiert wird. Jedoch können diese Verspannungen im System auch dazu genutzt werden die Lauffähigkeiten eines Roboters positiv zu beeinflussen [Roennau et al., 2011a]. Der Unterschied zwischen klassischen *homogenen Schrittweiten* und *heterogenen Schrittweiten* ist in Abbildung 6.21 konzeptionell dargestellt. In

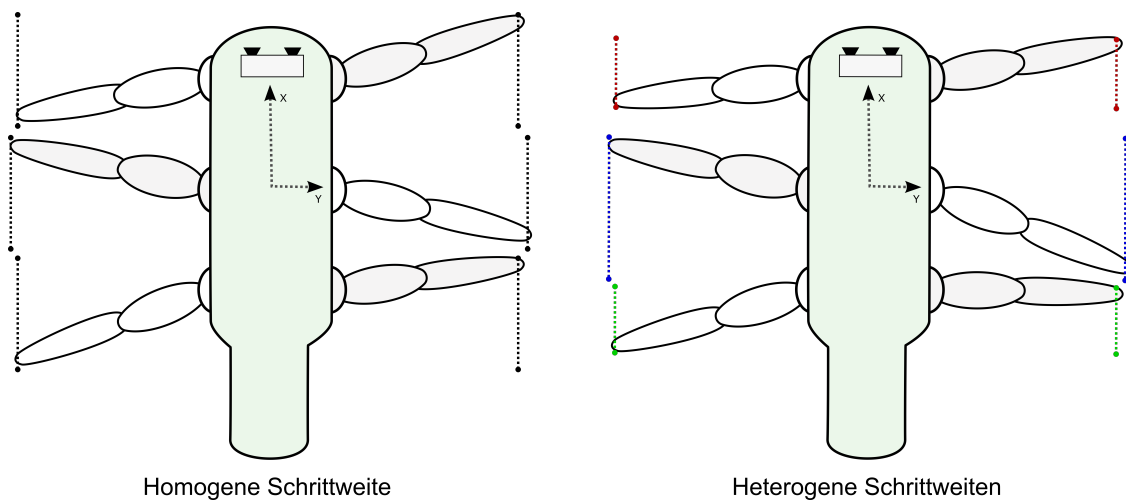


Bild 6.21.: Gegenüberstellung homogener und heterogener *Schrittweiten*: (links) *homogene Schrittweiten* - alle Beine verwenden die gleiche Schrittweite, (rechts) *heterogene Schrittweiten* - die vorderen und hinteren Beine verwenden deutlich kleinere Schrittweiten.

zahlreichen Experimenten mit dem Laufroboter *LAURON IVc* wurde untersucht wie sich unterschiedliche, *heterogene Schrittweiten* auf die Belastung in den Alpha-Gelenken von *LAURON IVc* und dessen Laufgeschwindigkeit auswirken (siehe *LAURON* Gelenkdefinition in Abb.3.15). Die *Schrittweite* des mittleren Beinpaars wurde hierbei stets als Referenzgröße verwendet. Die *Schrittweiten* der vorderen und hinteren

Beine werden im Verhältnis hierzu angegeben. In der Tabelle 6.5 sind die Ergebnisse von 9 Experimenten dargestellt. Das Experiment R1 ist das Referenz-Experimente mit homogenen *Schrittweiten*. Neben der Ge-

| Experiment | Vorne:Mitte:Hinten | Schrittweite | Geschw. [cm/s] | Energie pro Schritt [J] |
|------------|--------------------|--------------|----------------|-------------------------|
| R_1 | 1,0 : 1 : 1,0 | 100 | 1.49 | 6249 |
| R_2 | 0,8 : 1 : 1,1 | 100 | 1.48 | 6390 |
| R_3 | 1,4 : 1 : 1,1 | 100 | 2.28 | 3257 |
| R_4 | 1,1 : 1 : 1,4 | 100 | 2.15 | 4131 |
| R_5 | 0,9 : 1 : 0,9 | 100 | 1.67 | 5508 |
| R_6 | 0,5 : 1 : 0,5 | 100 | 0.78 | 12411 |
| R_7 | 1,5 : 1 : 1,5 | 100 | 2.78 | 3151 |
| R_8 | 0,5 : 1 : 0,5 | 200 | 2.09 | 4884 |

Tabelle 6.5.: Experiment mit heterogenen *Schrittweiten* zeigt, dass gezielte Verspannungen einen positiven Effekt auf die Laufgeschwindigkeit haben können. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2011a]

schwindigkeit ist auch die verbrauchte Energie pro Schritt beschrieben. Bei kleineren *Schrittweiten* in den vorderen Beinen reduziert sich die Laufgeschwindigkeit (siehe z.B. R_2 und R_6). In diesen Fällen stieg auch die verbrauchte Energie pro Schritt. Wird hingegen die *Schrittweite* vorne vergrößert wie in R_3 und R_7 kann die Geschwindigkeit sowie die Energieeffizienz deutlich gesteigert werden. In diesen Experimenten wurde auch die *Schrittweite* der hinteren Beine vergrößert. So können die hinteren Beine ähnlich wie bei vielen Insekten und Tieren zu einem größeren Anteil zum Vortrieb beitragen.

Die so erzeugte mechanische Spannung im Lokomotionsapparat hat einen deutlichen Effekt auf die Laufleistung. In der Natur besteht eine klare Funktionstrennung der Beine. Die hinteren Beine sorgen vor allem für den Vortrieb. Dies wird bisher bei den meisten technischen Laufrobotern nicht umgesetzt. Der Einsatz von heterogenen *Schrittweiten* ist eine einfache, aber wichtige Methode um eine Funktionstrennung der Beine zu ermöglichen und die Laufgeschwindigkeit zu erhöhen.

Optimierte Bewegungstrajektorien Eine weitere Möglichkeit die Geschwindigkeit eines Laufroboters zu steigern liegt in der Wahl der Bewegungstrajektorien. Oft werden für Laufroboter bisher nur sehr einfache Bewegungstrajektorien gewählt (z.B. Parabel, Kreis oder sogar nur ein Rechteck). Schaut man sich natürliche Bewegungstrajektorien von Insekten und Tieren an, ist zu erkennen, dass diese jedoch deutlich komplexer sind. In dieser Arbeit wurde ein Konzept entwickelt, mit dem sich Bewegungstrajektorien einfach und schnell optimieren lassen [Roennau et al., 2014a][Hel12]. Die Abbildung 6.22 beschreibt das System zur Online-Adaption von Bewegungstrajektorien für Laufroboter mit vier, sechs oder acht Beinen. Das System ist unabhängig von der konkreten Kinematik und nutzt einen numerischen Solver um die inverse Kinematik eines beliebigen Bein-Modells zu lösen. So können schnell verschiedene Systeme miteinander verglichen werden, aber auch viele verschiedene Systeme einfach von dem Optimierungstool profitieren. Zur Definition der Bewegungstrajektorien wird das im Kapitel 5 vorgestellte mathematische Modell mit den Beziérkurven fünften Grades verwendet.

Der Vorteil der eindeutig definierten Bewegungstrajektorien liegt darin, dass sie schnell und einfach über eine interaktive Bedienoberfläche (siehe Abbildung 6.23) angepasst werden können. Es müssen z.B. nicht alle 16 Stützpunkte für das mathematische Modell manuell definiert werden. Insbesondere Gradient-Punkte und Shape-Punkte werden automatisch hinzugefügt. Diese können interaktiv verschoben und die Form der Trajektorie nahezu beliebig angepasst werden. Durch die Verwendung der Beziérkurven fünften Grades und

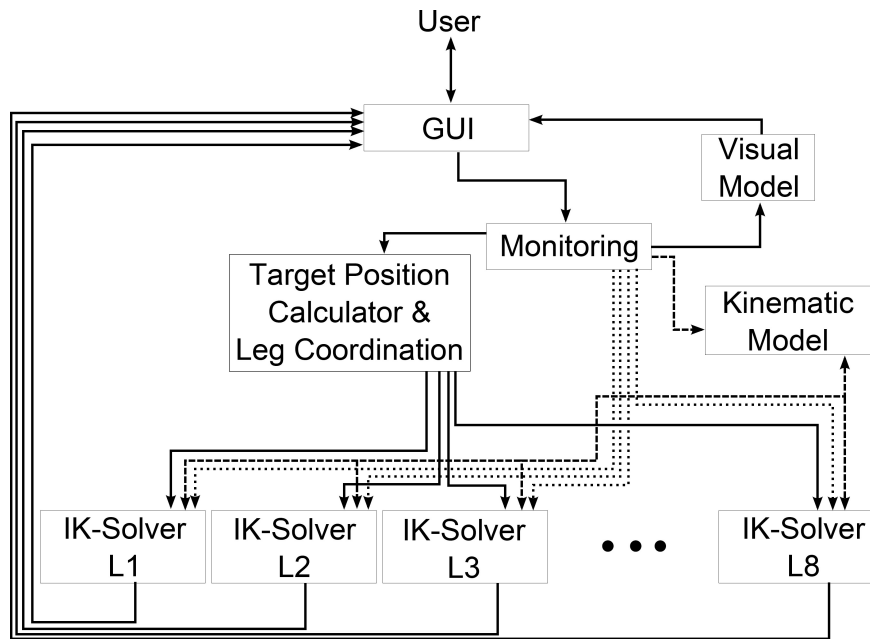


Bild 6.22.: Konzept zur Online-Adaption von Bewegungstrajektorien für verschiedene Laufroboter. Quelle [Hel12]

den geschickt gewählten Gradient-Punkten kann sichergestellt werden, dass setzt ruckfreie, stetige Trajektorien entstehen. Eine Evaluation dieser Optimierungsmethode wird mit Hilfe des Laufroboters *LAURON IVc* im Kapitel 7 vorgestellt und diskutiert. Außerdem wurde das Konzept inklusive der mathematischen Modellierung bereits erfolgreich auf der CLAWAR Fachkonferenz veröffentlicht [Roennau et al., 2014a].

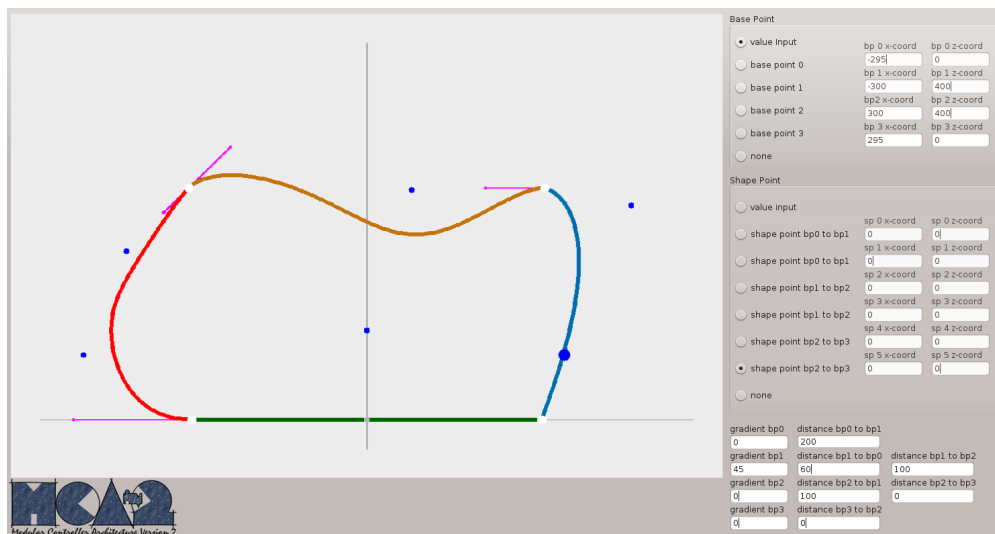


Bild 6.23.: Graphical User Interface (GUI) zur interaktive Anpassung der Bewegungstrajektorie. Quelle [Roennau et al., 2014a]

6.3. Optimierung der Energieeffizienz

Laufroboter sind insbesondere in den letzten Jahren deutlich robuster und intelligenter geworden. Somit rückt der professionelle bzw. kommerzielle Einsatz von Laufrobotern immer näher und der Energieverbrauch wird immer wichtiger. Um die Fähigkeiten von Laufrobotern auch in Anwendungen einsetzen zu

können, müssen jedoch Einsatzzeiten von mehreren Stunden möglich werden. Die Steigerung der Energieeffizienz ist somit eine zentrale und wichtige Herausforderung. In diesem Abschnitt werden zunächst kinematische Optimierungsansätze vorgestellt, die vor allem bei der Entwicklung neuer Laufroboter wichtig sind. Des Weiteren wird gezeigt wie durch geschickte Wahl oder Anpassung der Lokomotionsparameter die Energieeffizienz gesteigert werden kann.

6.3.1. Kinematische Optimierung der Energieeffizienz

Im Gegensatz zu radgetriebenen Fahrzeugen benötigen die meisten Laufroboter viel Energie alleine um aufrecht zu stehen. Die Aktuatorik muss auch im Stand das Gewicht des Roboters aktiv tragen. Die Kinematik hat dabei großen Einfluss auf den Energieverbrauch im Stand. Nicht nur durch Veränderungen der Segmentlängen und Gelenkpositionen, sondern auch durch die Standbreite und Höhe lässt sich bei einer festen Kinematik gezielt Energie einsparen.

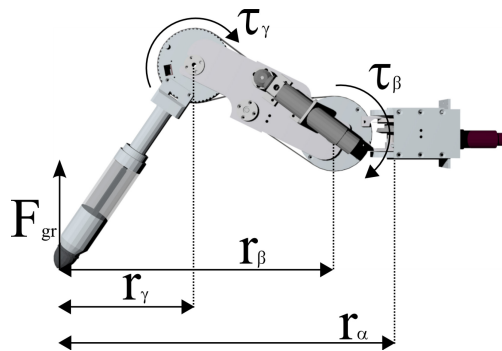


Bild 6.24.: Effektive Hebelarmlängen beeinflussen den Energieverbrauch in den Gelenken. Quelle [Hep11]

Optimierte Standbreite Im Stand hängt der Energieverbrauch bzw. die Leistungsaufnahme direkt von den benötigten Drehmomenten in den Gelenken ab. Die Drehmomente hängen von den effektiven Hebelarmlängen ab [Roennau et al., 2012c][Hep11]. In der Abbildung 6.24 sind beispielhaft die Hebelarme der drei Gelenke ALPHA, BETA, GAMMA des Laufroboters *LAURON IVc* dargestellt. Für eine Optimierung

| Standbreite | 780mm | 880mm | 980mm |
|-----------------------------|----------|----------|----------|
| Energieverbrauch (300 sec.) | 37,91kWs | 38,26kWs | 41,24kWs |

Tabelle 6.6.: Energieverbrauch des Roboters *LAURON IVc* in Abhängigkeit von der Standbreite

der Energieeffizienz durch die Reduktion der Halteenergie müssen die Drehmomente minimiert werden. Hierzu sollten die Hebelarmlängen durch die Beinstellung im Stand, aber auch beim Laufen aktiv verkleinert werden. In Abbildung 6.25 sind drei Standbreiten von *LAURON IVc* dargestellt. In diesem Experiment konnte gezeigt werden, dass der Energieverbrauch unmittelbar von der Standbreite abhängt. Wie erwartet kann der Energieverbrauch durch einen schmalen Stand, mit kurzen effektiven Hebelarmen, reduziert werden. Die Halteenergie wird kontinuierlich während der Lokomotion benötigt und ist oft größer als die benötigte Energie für den Vortrieb. Die systematische Optimierung der Halteenergie ist ein einfacher, effektiver Ansatz um die Gesamteffizienz eines Roboters zu verbessern.

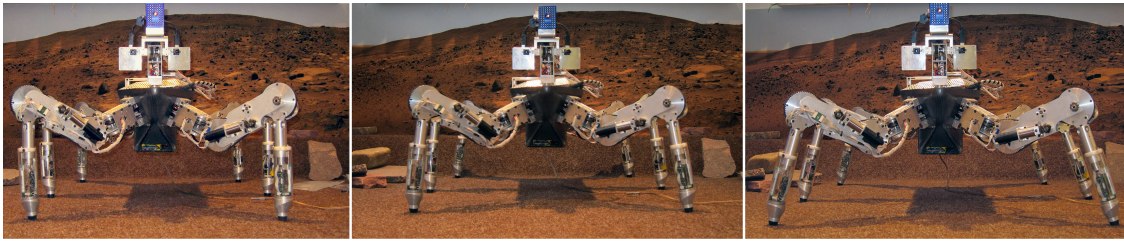


Bild 6.25.: Der Energieverbrauch eines Laufroboter hängt auch im Stand von der Kinematik ab: (links) schmaler Stand mit 780mm, (mittig) mittlerer Stand mit 880mm, (rechts) breiter Stand mit 980mm. Quelle [Roennau et al., 2012c]

Optimierte Standhöhe Ein kritischer Blick auf die eingesetzte Antriebstechnik kann weitere Optimierungspotentiale sichtbar werden lassen. Die bei LAURON eingesetzte Kombination aus Kegelrad- und Planetengetriebe hat einen schlechten Wirkungsgrad. Solche Getriebestufen erzeugen hohe Reibverluste, die sich in der Regel nur schwer minimieren lassen. Jedoch kann diese eigentlich unerwünschte Reibung aktiv genutzt werden um die Energieeffizienz zu steigern. In der Abbildung 6.26 ist der Energieverbrauch des Lauroboters *LAURON IVc* dargestellt. Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass der Energieverbrauch im Stand signifikant reduziert werden kann, indem die Getriebereibung aktiv genutzt wird [Hep11]. In beiden Experimenten wurde die Standhöhe nach ca. 5 Sekunden leicht angehoben. Beim zwei-

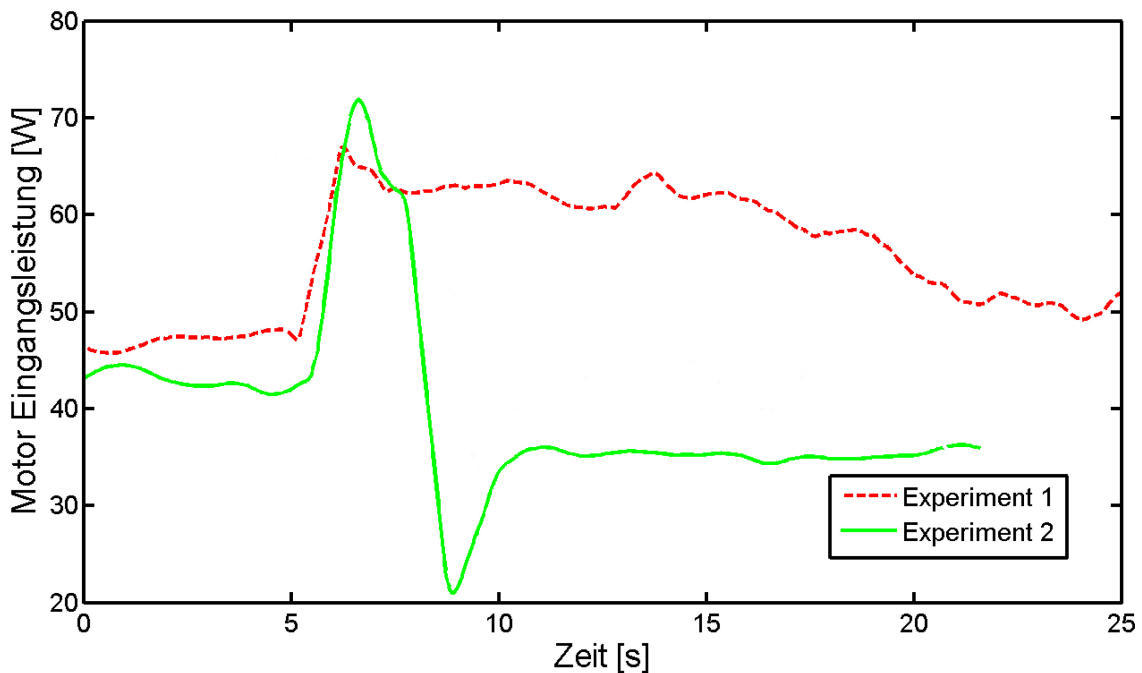


Bild 6.26.: Die intelligente Regelung der Körperhöhe kann verwendet werden um den Energieverbrauch im Stand signifikant zu reduzieren: Experiment 1: die Körperhöhe wird nach ca. 5 Sekunden auf die Zielhöhe angehoben, was zu einem erhöhten Energieverbrauch führt, Experiment 2: die Körperhöhe wird ebenfalls nach 5 Sekunden angehoben, aber kurz darauf wieder leicht auf die gleiche Zielhöhe wie bei Experiment 1 abgesenkt, was zu einer deutlichen Minimierung des Energieverbrauchs führt. Quelle (modifiziert) [Hep11]

ten Experiment wurde diese jedoch bewusst leicht höher angehoben als die Zielhöhe. Anschließend wurde sie wieder leicht abgesenkt um die Zielhöhe zu erreichen. Diese Abwärtsbewegung in Richtung der Gravitation entlastet die Getriebe kurzfristig und führt dazu, dass beim anschließendem Halt auf der Zielhöhe, die Getriebereibung einen größeren Anteil der statischen Belastung übernehmen kann. Die so erreichbare

Energiereduktion liegt bei bis zu ca. 40%. Der Effekt kann nur beim Stehen ausgenutzt werden, bietet aber dennoch viel Einsparpotential, da Laufroboter öfter stehen um Daten zu sammeln, Objekte zu manipulieren oder komplexen Aufgaben zu planen.

Virtuell optimierte Laufbreite Die Optimierung der Standbreite kann nicht nur empirisch mit den Analysewerkzeugen zur Energiemessung aus Kapitel 5 erfolgen, sondern auch unter Einsatz einer dynamischen Simulationsumgebung. Hierzu wurde gezeigt wie es möglich ist kinematische Eigenschaften eines sechsbeinigen Laufroboters schnell virtuell zu variieren und anschließend die Effekte dieser Veränderungen zu untersuchen [Sut12]. Analog zu der Optimierung der Standbreite anhand realer Energiemessungen wurde die Laufbreite in *RoADS* virtuell verändert (siehe Abbildung 6.27). In diesem Experiment wurde bewusst

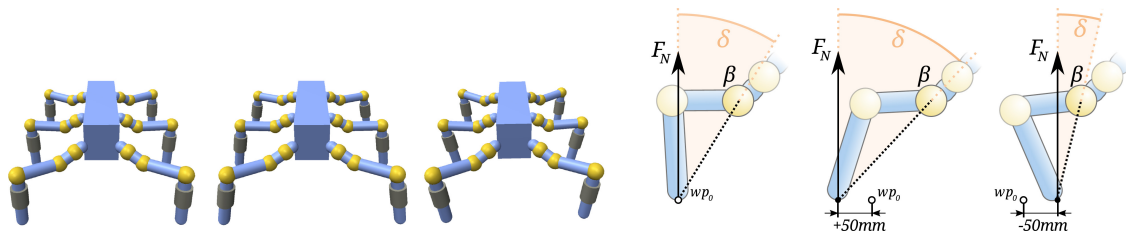


Bild 6.27.: Veränderung der Schrittweite in *RoADS* um $\pm 50\text{mm}$: (links) Normale Standbreite, (mittig) Breite Standbreite, (rechts) Schmale Standbreite. Quelle [Sut12]

neben der normalen Laufbreite und breiteren Laufbreite auch eine schmalere Standbreite untersucht. Anhand der veränderten Drehmomente des BETA-Gelenks des mittleren Beins 2 ist deutlich zu erkennen, dass der Energieverbrauch wie erwartet von der Laufbreite abhängt (siehe Abbildung 6.28). Die Drehmomente korrelieren direkt mit dem Stromverbrauch der virtuellen Motoren und somit mit dem Energieverbrauch des Roboters. Die Minimierung der virtuellen Drehmomente entspricht somit der Minimierung der Energie in *RoADS*. In den Stemmphasen ist zu erkennen, dass der Betrag des Drehmoments mit schmalere Standbreite am kleinsten ist. Die Ergebnisse dieses Experiments validieren nochmals die Ergebnisse aus der Standbreiten-Untersuchung.

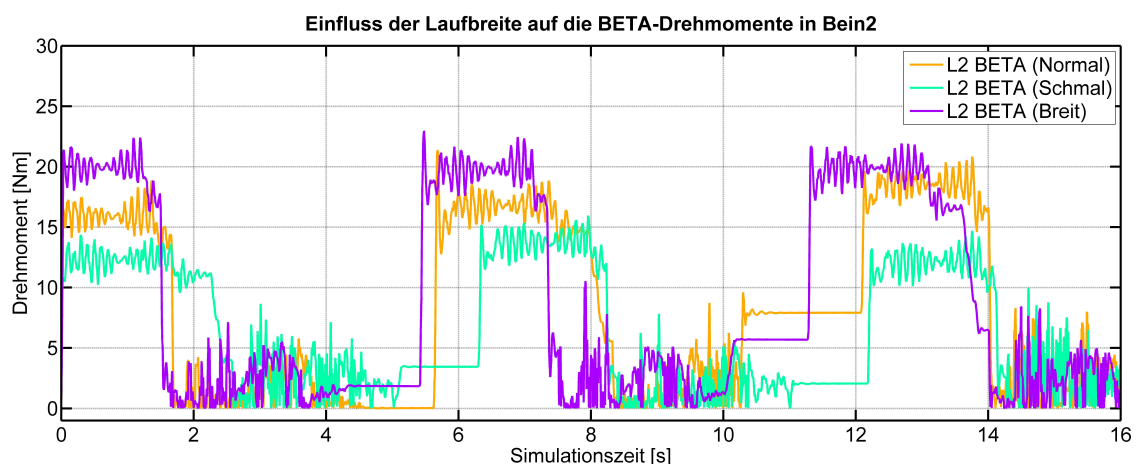


Bild 6.28.: Drehmomente des BETA-Gelenks beim Laufen mit verschiedenen Laufbreiten. Die Momente zeigen, dass der Energieverbrauch mit der Laufbreite zunimmt. Quelle (modifiziert) [Sut12]

Virtuell optimierte Segmentlängen Zusätzlich bietet *RoadS* die Möglichkeit Untersuchungen vorzunehmen, die mit dem realen Roboter nicht umsetzbar sind [Sut12]. In einem zweiten hier gezeigten Experiment soll die BETA-Segmentlänge verändert werden und der Einfluss auf den Energieverbrauch untersucht werden. Dabei wurde die Laufbreite konstant gehalten (siehe Abbildung 6.29). In der Abbildung 6.30 sind

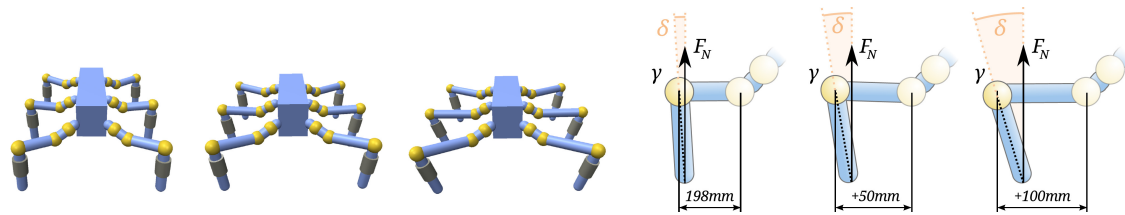


Bild 6.29.: Veränderung der BETA-Segmentlänge um 50mm bzw. 100mm. Quelle [Sut12]

die GAMMA-Drehmomente für die drei verschiedenen Kinematiken während einer Laufbewegung dargestellt. Mit zunehmender BETA-Segmentlänge werden auch die Drehmomente im GAMMA Gelenk größer. Diese Beobachtung überrascht nicht, da wie in Abbildung 6.24 gezeigt, der effektive Hebelarm des

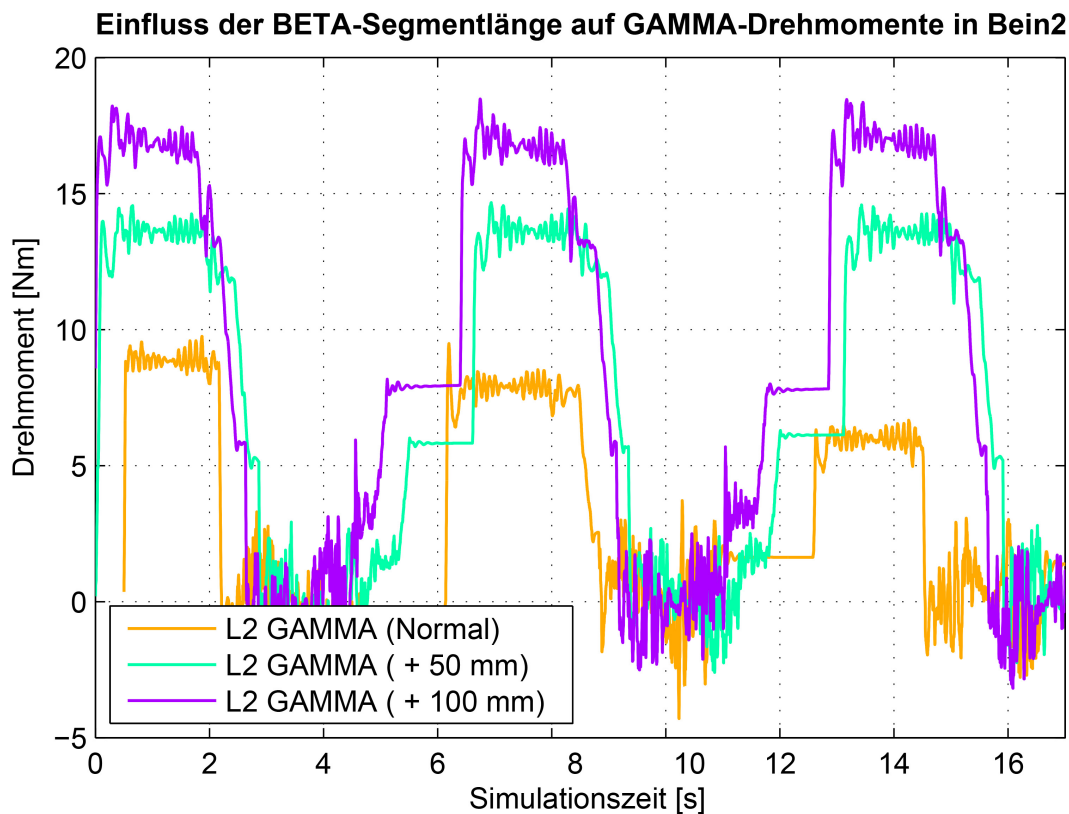


Bild 6.30.: Drehmomente des GAMMA-Gelenks beim Laufen mit veränderter Kinematik (neue Längen des Beta-Segments +50mm und +100mm). Quelle (modifiziert) [Sut12]

GAMMA-Gelenks sich gegenüber der normalen kinematischen Konfiguration vergrößert. Die Simulationsumgebung *RoadS* macht solche Untersuchungen aber überhaupt erst möglich und zeigt so Methoden um den Energieverbrauch durch kinematische Variationen zu optimieren.

6.3.2. Optimierung der Lokomotion zur Minimierung des Energieverbrauchs

Oft werden einfache Beintrajektorien, homogene *Schrittweiten* und klassische Laufmuster als Lokomotionsparameter für mehrbeinige Laufroboter verwendet. Diese Parameter bieten jedoch einiges an Potential um aktiv Energie einzusparen und so die Einsatzdauer von Laufrobotern zu verlängern.

Optimierung der Schrittweite, Zykluszeit und Laufmuster Zur Optimierung der Energieeffizienz eines Laufroboters sollten zahlreiche Effekte gleichzeitig betrachtet werden. Wird die Laufgeschwindigkeit erhöht, kann dies Energie einsparen, da der Roboter nicht so lange das eigene Gewicht tragen muss. Gleichzeitig erhöhen sich durch die größere Laufgeschwindigkeit auch die Winkelgeschwindigkeiten in den Gelenken. Dabei macht es einen Unterschied, ob die Geschwindigkeit durch ein verändertes Laufmuster mit einem niedrigerem *Dutyfactor*, einer kürzeren *Zykluszeit* oder größeren *Schrittweiten* gesteigert wird. Um diese und weitere Effekte zu untersuchen wurde eine präzise dynamische Simulation für den Laufroboter *LAURON IVc* entwickelt [Hep11]. Diese Simulation beinhaltet die exakten kinematischen Größen (Segmentlängen, Gelenkpositionen), die dynamischen Kenngrößen (Gewichte, Schwerpunkte und Trägheitsmatrizen der beweglichen Elemente) sowie detaillierte Motormodelle mit Getriebestufen. Da der Fokus auf der reinen Lokomotion liegt, wird nur der Energieverbrauch der Motoren betrachtet und der Verbrauch weiterer Komponenten wie Sensoren, PCs oder Elektronik hier nicht berücksichtigt. Um den Einfluss der Lokomotionsparameter zu analysieren wird die *Specific Resistance* verwendet. In einer ersten Analyse wurde die Laufgeschwindigkeit des simulierten Roboters kontinuierlich erhöht indem die *Schrittweite* vergrößert wurde. In der Abbildung 6.31 sind die Ergebnisse dieser Analyse detailliert dargestellt. Die blaue Kurve in

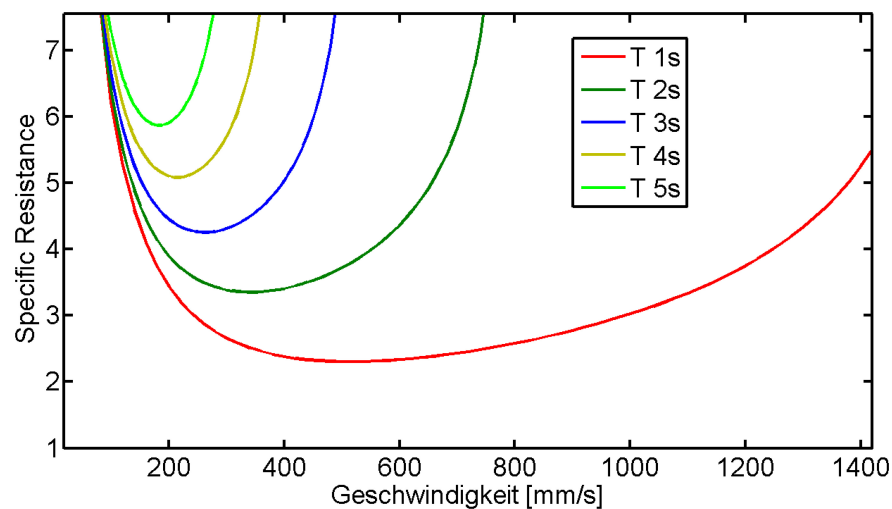


Bild 6.31.: *Specific Resistance* in Abhängigkeit von der Laufgeschwindigkeit: die Laufgeschwindigkeit wurde über die *Schrittweite* langsam erhöht. Die verschiedenen Kurven zeigen den Einfluss der *Zykluszeit* T auf die *Specific Resistance*. Eine kürzere *Zykluszeit* ist bei allen Geschwindigkeiten von Vorteil. Quelle [Hep11]

dieser Abbildung zeigt, dass sich die Energieeffizienz zunächst mit steigender Geschwindigkeit verbessert, bevor sie sich ab ca. 300mm/s wieder verschlechtert (kleine Werte der *Specific Resistance* sind besser als große Werte). Größere *Schrittweiten* zur Geschwindigkeitssteigerung sind somit nur in bestimmten Bereichen vorteilhaft und sollten entsprechend mit Bedacht als Optimierungsansatz verwendet werden. Weiter ist in der Abbildung 6.31 zu erkennen, dass eine weitere Geschwindigkeitssteigerung über die Veränderung der *Zykluszeit* möglich ist (unterschiedlich farbige Kurven). Die grundlegende Form dieser Kurven ähnelt

der blauen Kurve, sodass ein wichtiges Ergebnis festgehalten werden kann: die *Schrittweite* sollte für energieeffizientes Laufen nicht zu groß und nicht zu klein gewählt werden. Die Verkleinerung der *Zykluszeit* hat dahingegen stets einen positiven Effekt. Insgesamt ist sogar energetisch vorteilhafter kleine schnelle Schritte zu machen als große langsame. Die *Zykluszeit* ist somit der wichtigere Parameter, der stets als erstes bei der Optimierung betrachtet werden sollte. In einer weiteren Analyse wurde untersucht, wie sich

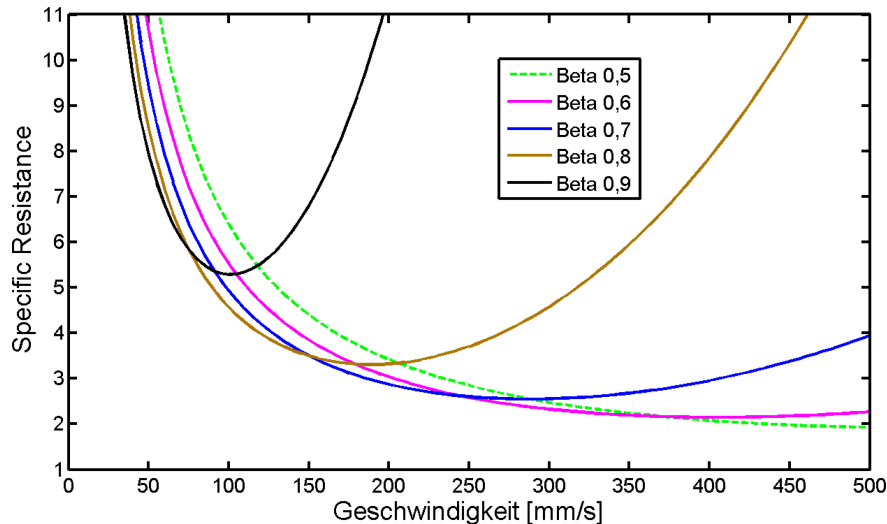


Bild 6.32.: *Specific Resistance* in Abhängigkeit von der Laufgeschwindigkeit: die Laufgeschwindigkeit wurde wieder über die *Schrittweite* erhöht. Die verschiedenen Kurven zeigen hier den Einfluss des Laufmusters auf die *Specific Resistance*. Das Tripod-Laufmuster ($\beta = 0,5$) ist nicht das effizienteste Laufmuster bei niedrigen Geschwindigkeiten. Quelle [Hep11]

die Veränderung des Laufmusters auf die Energieeffizienz auswirkt. Hierzu wurde ein Laufmuster implementiert, das über den *Dutyfactor* β fließend zwischen einem *Tripod*, *Tetrapod* und *Pentapod* Laufmuster wechseln kann. In der Abbildung 6.32 sind die Kurven für die verschiedenen Laufmuster dargestellt. Die Geschwindigkeit wurde in dieser Analyse über die *Schrittweite* langsam gesteigert. Interessanterweise ist das *Tripod*-Laufmuster (*Dutyfactor* $\beta = 0,5$) nicht immer das effizienteste. Um die Energieeffizienz eines Laufroboters zu steigern sollte somit das Laufmuster je nach Geschwindigkeit angepasst werden. Dieses Ergebnis stimmt auch mit Beobachtungen bei Tieren und Insekten überein [52]. Pferde verändern nachweislich ihr bevorzugtes Laufmuster in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit [100].

Optimierung der Beintrajektorien Die Schwing- und Stemmtrajektorien werden bei Laufroboter oft relativ einfach modelliert. Dabei zeigen Untersuchungen von Biologen, dass diese bei Insekten und Tieren keinesfalls alle parallel zur Laufrichtung und durch einfache geometrische Funktionen beschreibbar sind [89] [53]. Der Einsatz von unterschiedlich großen, heterogenen *Schrittweiten* hat bereits gezeigt, dass es möglich ist mit einfachen Mitteln die Geschwindigkeit und Energieeffizienz eines Laufroboters zu optimieren (siehe oben). Hier wird untersucht, ob es möglich ist durch Veränderung der Schwingtrajektorien weitere Energieeinsparungen zu erreichen. In zahlreichen, virtuellen Laufexperimenten in *RoadS* wurden die Schwingtrajektorien systematisch verändert [Hub15]. Zunächst wurde hierzu in einer ersten Versuchsreihe der *AEP* oder der *PEP* entlang der Y-Achse verschoben, so dass die Schwing- und Stemmtrajektorien gegenüber dem Körper geneigt sind (siehe Abbildung 6.33). Es wurden jeweils vier positive und vier negative Neigungswinkel untersucht. In der Abbildung 6.34 sind sowohl die resultierende Laufgeschwindigkeit sowie

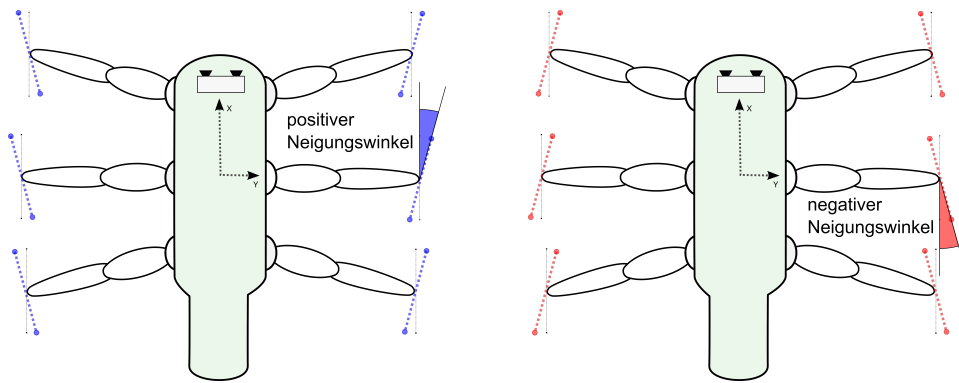


Bild 6.33.: Anpassung der Schwing- und Stemmtrajektorien durch Neigung zum Körper: (links) positive Neigungswinkel, (rechts) negative Neigungswinkel.

die durchschnittliche Leistung (der aktuelle Energieverbrauch) in Abhängigkeit des Neigungswinkels dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein negativer Neigungswinkel zu einer Geschwindigkeitssteigerung führt.

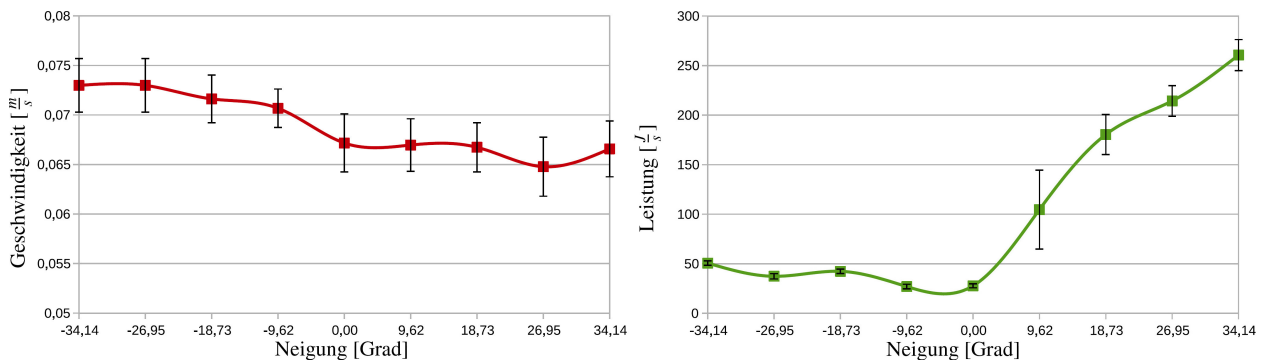


Bild 6.34.: Geschwindigkeit und Leistungsaufnahme bei Neigung der Beintrajektorien. Quelle (modifiziert) [Hub15]

Der Energieverbrauch bleibt für negative Neigungswinkel ungefähr auf dem gleichen Niveau. Weiter ist in der Abbildung 6.34 im rechten Teil zu sehen, dass die Leistungsaufnahme bei positiven Neigungswinkeln stark steigt und die Geschwindigkeit gleichzeitig leicht sinkt. Hier hat erhöhter Schlupf zu einer deutlich verschlechterten Laufleistung geführt. In der Tabelle 6.7 sind alle Messwerte zusammengefasst und um die *Specific Resistance* ergänzt. Zur Berechnung der *Specific Resistance* wurde für den virtuellen Laufroboter ein Gewicht von 28 kg angenommen. Aus der Tabelle wird deutlich, dass ein kleiner negativer Neigungswin-

| Neigungswinkel [°] | Geschwindigkeit [m/s] | Leistung [J/s] | Specific Resistance |
|--------------------|-----------------------|----------------|---------------------|
| -34,1 | 0,073 | 50,612 | 2,524 |
| -27,0 | 0,073 | 37,323 | 1,861 |
| -18,7 | 0,072 | 42,343 | 2,153 |
| -9,6 | 0,071 | 26,950 | 1,388 |
| 0,0 | 0,067 | 27,679 | 1,500 |
| +9,6 | 0,067 | 104,650 | 5,686 |
| +18,7 | 0,067 | 180,467 | 9,850 |
| +27,0 | 0,065 | 214,346 | 12,042 |
| +34,1 | 0,067 | 260,636 | 14,247 |

Tabelle 6.7.: Energieeffizienz verändert sich mit dem Neigungswinkel der Beintrajektorien. Quelle (modifiziert) [Hub15]

6. Optimierung von mehrbeinigen Laufvorgängen

kel die Energieeffizienz des Roboters verbessern kann. Insgesamt haben die negativen Neigungswinkel eine ähnliche Effizienz wie Beintrajektorien ohne Neigungswinkel. Positive Neigungswinkel haben eine deutlich schlechtere Effizienz und niedrigere Geschwindigkeit. Sie sollten entsprechend vermieden werden.

In einer zweiten Experimentreihe wurden nicht nur die Beintrajektorien geneigt, sondern auch die Schwingtrajektorie so verändert, dass die Gesamtrajektorie nicht mehr in einer Ebene liegt. Die Schwingbewegung ist eine nach außen gerichtete, parabelförmige Bewegung in Y-Richtung. Diese veränderte Schwingbewegung wurde von Untersuchungen bei der Stabheuschrecke inspiriert [89] [53]. In der Abbildung 6.35 sind die Schwing-Stemm-Trajektorien für einen positiven (links) und einen negativen Neigungswinkel (rechts) dargestellt. Wie zuvor wurden wieder vier positive und vier negative Neigungswinkel untersucht. Die Ergeb-

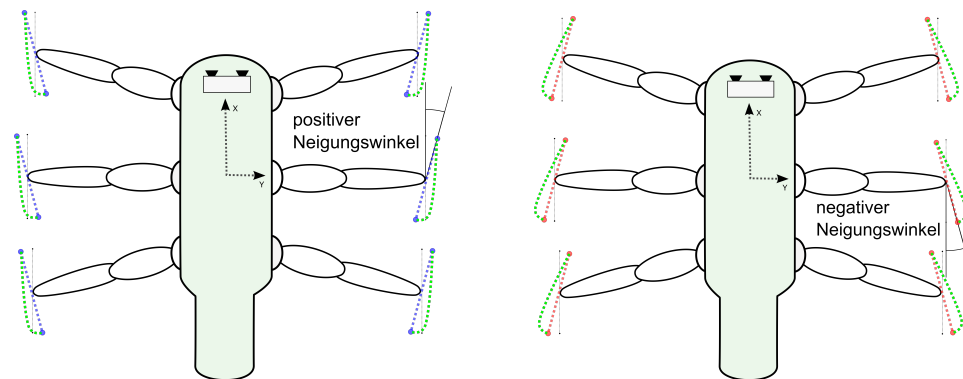


Bild 6.35.: Geneigte der Schwing- und Stemmtrajektorien mit zusätzlicher, parabelförmiger Schwing-Trajektorie: (links) positive Neigungswinkel, (rechts) negative Neigungswinkel.

nisse bezüglich der Geschwindigkeitsänderung sowie der veränderten Leistungsaufnahme sind in Abbildung 6.36 visualisiert. Der Effekt der Neigungswinkel bleibt auch bei der parabelförmigen Schwingtrajektorie

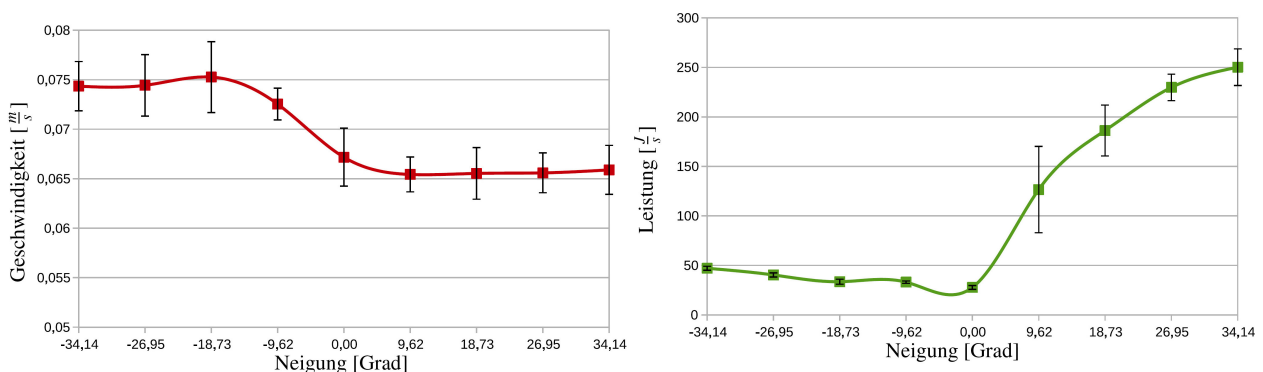


Bild 6.36.: Geschwindigkeit und Leistungsaufnahme bei Neigung der Beintrajektorien mit zusätzlich veränderter Schwingtrajektorie. Quelle (modifiziert) [Hub15]

erhalten. Negative Neigungswinkel haben einen positiven Effekt auf die Geschwindigkeit bei einer leicht erhöhten Leistung. Bei positiven Neigungswinkeln verändert sich die Geschwindigkeit im Gegensatz zu der vorherigen Versuchsreihe gar nicht. Die benötigte Leistung wächst für positive Neigungswinkel noch stärker als zuvor mit den normalen Schwingbewegungen. In der Tabelle 6.8 sind alle Messwerte inklusive der *Specific Resistance* als Effizienzmaß dargestellt. Die Geschwindigkeiten bei negativen Neigungswinkel sind mit der parabelförmigen Schwingtrajektorie sogar leicht höher als in der vorherigen Versuchsreihe. Dafür sind jedoch auch die Leistungen im Durchschnitt höher.

| Neigungswinkel [°] | Geschwindigkeit [m/s] | Leistung [J/s] | Specific Resistance |
|--------------------|-----------------------|----------------|---------------------|
| -34,1 | 0,074 | 47,038 | 2,304 |
| -27,0 | 0,074 | 40,290 | 1,972 |
| -18,7 | 0,075 | 33,463 | 1,618 |
| -9,6 | 0,073 | 33,012 | 1,658 |
| 0,0 | 0,067 | 27,679 | 1,500 |
| +9,6 | 0,065 | 126,600 | 7,047 |
| +18,7 | 0,066 | 186,280 | 10,354 |
| +27,0 | 0,066 | 229,803 | 12,753 |
| +34,1 | 0,066 | 250,250 | 13,825 |

Tabelle 6.8.: Energieeffizienz verändert sich mit dem Neigungswinkel der Beintrajektorien auch bei einer parabelförmigen Schwingbewegung. Quelle (modifiziert) [Hub15]

Die Veränderung der Beintrajektorien ist eine einfache, effektive Methode um die Geschwindigkeit, aber auch die Effizienz von mehrbeinigen Laufroboter zu verbessern. Insbesondere die negative Neigung der Trajektorien zum Körper zeigte interessante Effekte, die darauf schließen lassen, dass die in der Biologie beobachteten Trajektorien auch für Laufroboter verwendet werden sollten.

Optimierung Gelenkwinkelstellungen Wie bereits bei der Optimierung der Stabilität festgestellt wurde, können kinematische Redundanzen eines Roboters intelligent genutzt werden um die Lokomotion zu optimieren. Der entwickelte Partikel-Schwarm-Optimierer (PSO) (siehe Abschnitt 6.1.2) ist in der Lage gezielt die Belastungen der Alpha-Gelenke oder den Energieverbrauch zu reduzieren [Sch14]. Hierzu können dem PSO zwei unterschiedliche Fitnessfunktionen übergeben werden. Der Optimierer berechnet in jedem Regelungsschritt des Roboters eine optimale Gelenkwinkelkonfiguration, die die gewählte Fitnessfunktion minimiert. In der Abbildung 6.37 links sind die Drehmomente dargestellt, die bei einer Neigung des sechsbeinigen Laufroboters in den ALPHA-Gelenken ohne eine Optimierung der DELTA-Gelenke mit dem PSO entstehen. Der Roboter steht dabei mit sechs Beinen auf dem Boden und verändert die Orientierung (PITCH-Winkel) des Zentralkörpers gegenüber dem Boden. Diese Momente können durch den PSO

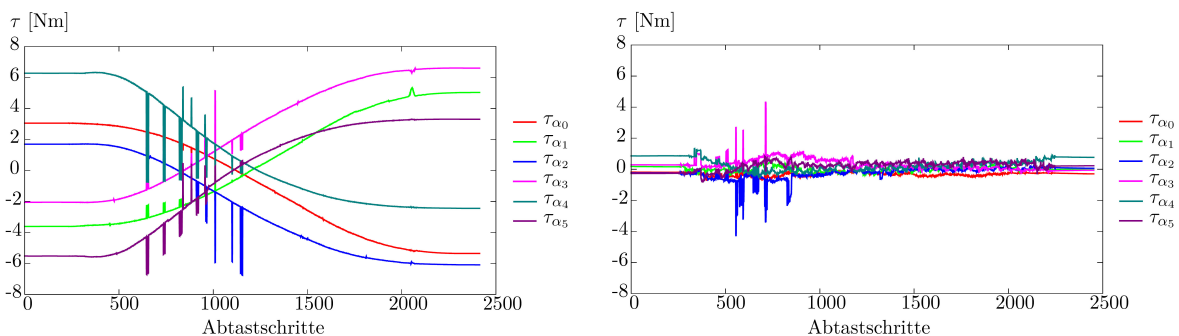


Bild 6.37.: Drehmomente beim Neigen des Roboters entlang der PITCH Achse: (links) vor der Optimierung treten hohe ALPHA-Momente auf, (rechts) der PSO-Optimierer kann die ALPHA-Momente auf ein Minimum reduzieren. Quelle [Sch14]

effektiv reduziert werden (siehe rechts in Abbildung 6.37). Durch diese Optimierung der Belastung in den Alpha-Gelenken kann insgesamt eine sanftere, effizientere Bewegung realisiert werden. Die Abbildung 6.38 zeigt, dass diese veränderte Bewegung sogar den Energieverbrauch reduzieren kann. Für diese Auswertung wurden reale Gelenkwinkeldaten mit Hilfe des Dynamikmodells zur Energieauswertung verwendet.

6. Optimierung von mehrbeinigen Laufvorgängen

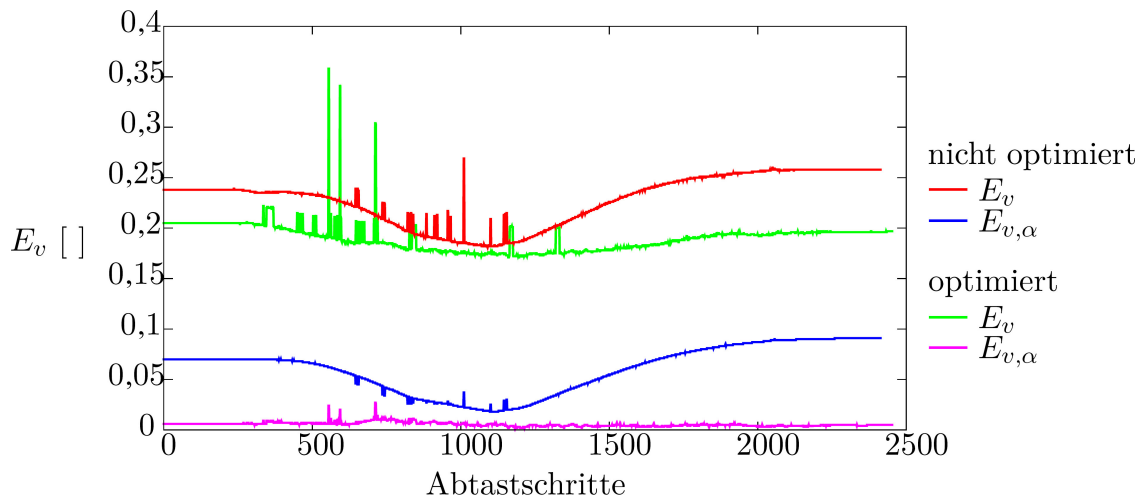


Bild 6.38.: Energie des Roboters beim Neigen entlang der PITCH Achse: (blau) Energieverbrauch der ALPHA-Gelenke beim Neigen vor der Optimierung, (rot) Gesamtenergieverbrauch vor der Optimierung, (lila) Energieverbrauch der ALPHA-Gelenke nach der PSO-Optimierung, (grün) Gesamtenergieverbrauch nach der PSO-Optimierung. Quelle [Sch14]

Der Partikel-Schwarm-Optimierer kann auch den Energieverbrauch während der Laufbewegung verbessern. Hierzu wurde eine *Tripod*-Laufbewegung ausgewertet. Im linken Teil der Abbildung 6.39 sind die vom PSO ermittelten DELTA-Gelenkwinkel dargestellt. Gut zu erkennen sind die reziprok-symmetrischen Verläufe für die jeweiligen Beinpaare (vorne: δ_0, δ_1 , mitte: δ_2, δ_3 , hinten: δ_4, δ_5). Im rechten Teil der Aus-

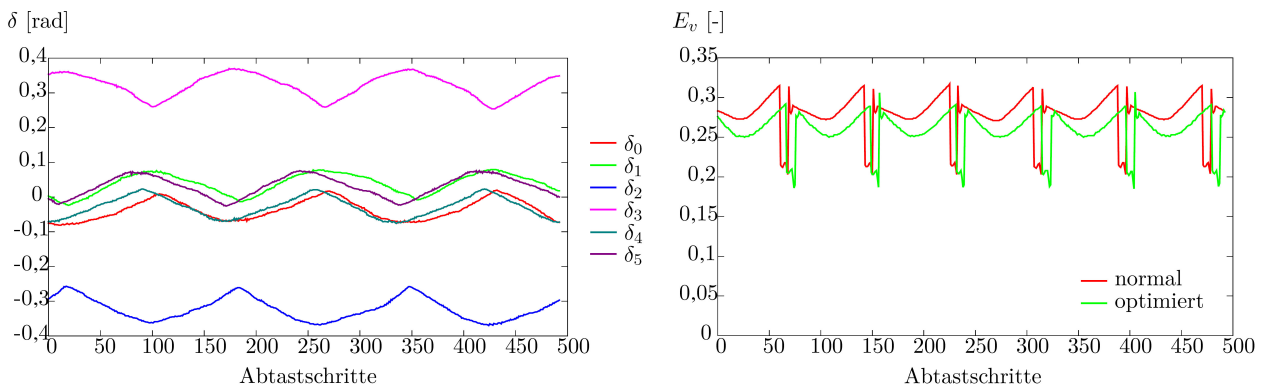


Bild 6.39.: Energieverbrauch beim Laufen: (links) Verläufe der DELTA-Gelenkwinkel beim optimierten Laufen, (rechts) Energieverbrauch beim Laufen. Quelle [Sch14]

wertung ist der Verlauf der summierten Ströme E_v dargestellt. Diese Ströme wurden anhand eines einfachen Motormodells und den aus dem Dynamikmodell stammenden Gelenk-Momenten ermittelt. Da der Strom eines DC-Motors linear von dessen Drehmoment und die Leistung wiederum linear vom Strom abhängt (bei konstanter Motorspannung), kann der Energieverbrauch (integrierte Leistung über die Zeit) über die summierten Ströme gut abgeschätzt werden. Die markanten Peaks im unteren Teil entstehen während des Lastwechsels von einer *Tripod*-Beingruppe zur anderen *Tripod*-Beingruppe.

Das entwickelte PSO Konzept ist in der Lage je nach Situation die Gelenkwinkelstellungen intelligent anzupassen. Das erlaubt die flexible Optimierung der Leistungskenngrößen und verbessert die Einsatzfähigkeiten des Roboters. Der Anwender kann zur Laufzeit die zu optimierende Fähigkeit auswählen und jederzeit ändern. Somit kann beim Überwinden von Hindernissen zum Beispiel zunächst die Stabilität verbessert werden, über lange Laufstrecken die Energieeffizienz und in kritischen Situationen wie Search-and-Rescue

Missionen vor allem die Geschwindigkeit optimiert werden. Das Konzept lässt sich einfach auf andere mehrbeinige Laufroboter übertragen und kann mit zusätzlichen Messdaten wie Motorströme noch bessere Optimierungsergebnisse erreichen.

6.4. Diskussion

Die entwickelten Optimierungsverfahren konzentrieren sich zum einen auf die Kinematik des Laufroboters und zum anderen steht die Lokomotion selbst im Fokus. Die kinematischen Optimierungsverfahren sind vor allem dazu geeignet bei der Konzeption neuer Laufroboter zu unterstützen, bieten z.T. aber auch Möglichkeiten bestehende Laufroboter weiter zu verbessern. Die Lokomotion zu optimieren ist sowohl für die Neusowie Weiterentwicklung von Laufrobotern wichtig. Oft können kleine Veränderungen wie z.B. die Trajektorienform entscheidende Unterschiede bewirken. Die Vor- und Nachteile der entwickelten Methoden und Ansätze werden in diesem Abschnitt ausführlich diskutiert. Dabei werden zunächst die Verfahren zur Verbesserung der Stabilität betrachtet. Des Weiteren werden die Ansätzen zur Optimierung der Geschwindigkeit und Energieeffizienz bewertet.

Optimierung der Stabilität Die vollständige Kinematik eines Laufroboters wird durch viele Parameter definiert. So besitzt ein Laufroboter mit sechs Beinen mit jeweils 3 Gelenken pro Bein bereits fast 100 kinematische Parameter. Diese Parameter weisen zudem verschiedene Abhängigkeiten auf und können nicht frei verändert werden. Der entwickelte genetische Ansatz erlaubt es dennoch diese vielen Parameter systematisch anhand einer Fitnessfunktion anzupassen. So können parallel zur die Stabilität zahlreiche weitere Leistungskriterien wie die Geschwindigkeit optimiert werden. Der Fokus auf wenige Kriterien ist vorteilhaft, da ansonsten widersprüchliche Ziele möglicherweise zu schlechteren Fitnesswerten führen. Jedoch benötigt der evolutionäre Algorithmus einige Annahmen, da ansonsten die Dimensionalität des Lösungsraumes zu groß wird. Weiter wird bei dem hier entwickelten Ansatz auch eine Dynamik-Simulation benötigt um die Fitness der Kinematiken zu bewerten. Auch mit der Annahme von Vorwissen und den bewussten Einschränkungen benötigt das rechenintensive Verfahren viele Stunden um eine Kinematik zu optimieren. Alternativ kann die Stabilität eines Laufroboters mit dezentralen, modularen Verhalten während der Lokomotion positiv beeinflusst werden. Dieser Ansatz ist äußerst robust und leicht auf viele verschiedene Kinematiken bzw. Robotersysteme übertragbar. Ein Nachteil ist, dass die Verhalten z.T. miteinander konkurrieren und nur auf aktuelle Sensordaten reagieren können. Das macht diesen Ansatz relativ langsam, da kein vorausschauendes Agieren oder Planen möglich ist. Der entwickelte Partikel-Schwarm-Optimierer (PSO) erlaubt es die Redundanzen in der Kinematik gezielt zur Optimierung von bestimmten Eigenschaften einzusetzen. Der PSO kann während der Ausführung sogar über die Fitnessfunktion angepasst werden und so je nach Gelände z.B. die Stabilität bevorzugen. Es ist jedoch auch möglich verschiedene, konkurrierende Eigenschaften in der Fitnessfunktion gleichzeitig zu optimieren. Der entwickelte PSO hat eine starke Abhängigkeit zum intern verwendeten Dynamikmodell. Weicht dieses Modell zu stark von dem realen Roboter ab, wird die Optimierung die Fähigkeiten des realen Roboters nicht verbessern können.

Optimierung der Geschwindigkeit Neben dem eigentlichen kinematischen Design des Roboterbeins spielt auch der Anstellwinkel der Beine am Zentralkörper eine wichtige Rolle. Die entwickelte Optimierungsmethode erlaubt es die Beine so am Zentralkörper zu befestigen, dass sich die *Schrittweiten* erhöhen

lassen. Hierzu wird der Arbeitsraum detailliert hinsichtlich der Manipulierbarkeit nach *Yoshikawa* untersucht und anhand von gezielten Schnitten systematisch ausgewertet. So lässt sich das volle Potential der Beinkinematik hinsichtlich der Laufgeschwindigkeit ausschöpfen. Alternativ zu dieser relativ aufwändigen und schwierig auszuwertenden Optimierung können auch biologische Vorbilder wichtige Designimpulse liefern. Die Ergebnisse der Optimierungen für den sechsbeinigen Laufroboter *LAURON V* sind z.B. der Morphologie der indischen Stabheuschrecke sehr ähnlich. Dies bestätigt zum einen die Richtigkeit des Optimierungsansatzes und zum anderen erhöht es die Motivation für biologisch inspirierte Roboterdesigns. Die Anpassung von Laufmustern an den jeweiligen Roboter ist eine wichtige Methode, die bei *LAURON* zu einer signifikanten Erhöhung der Laufgeschwindigkeit geführt hat. Jedoch sind solche, angepassten Laufmuster meist nicht auf andere Roboter übertragbar, die Methode angepasste Laufmuster zu entwickeln hingegen schon. Eine der wichtigsten, zentralen Informationen jedes Laufroboters sind die Bodenkontaktwerte. Der entwickelte, multimodale Fusionsansatz für die Bodenkontaktwerte mit Berücksichtigung von Hysterese-Effekten verbessert nahezu alle Eigenschaften eines Laufroboters. Neben der Geschwindigkeit erhöht sich so auch die Stabilität und Energieeffizienz. Die Verwendung von heterogenen, nicht gleichgroßen *Schrittweiten* für die verschiedenen Beinpaare ist ein einfacher Ansatz um die Funktionstrennung der Beine auch für Roboter mit gleichartigen Bein-Kinematiken zu ermöglichen. Zwar belasten die künstlich erzeugten Verspannungen die Mechanik, es konnte jedoch gezeigt werden, dass sich die Energieeffizienz sowie die Geschwindigkeit durch heterogene *Schrittweiten* verbessern lassen. Das präsentierte Werkzeug zur schnellen, intuitiven Anpassung der Bewegungstrajektorien erlaubt es verschiedene Trajektorien einfach auszuprobieren bzw. online zu verändern. So können auch biologisch inspirierte Trajektorien einfach verwendet werden, die die Geschwindigkeit des Roboters erhöhen.

Optimierung der Energieeffizienz Die Standbreite eines Laufroboters verändert dessen Energieverbrauch, da bei einem breiteren Stand die effektiven Hebelarme länger werden. Somit werden höhere Drehmomente und damit mehr Leistung während der Lokomotion benötigt. Zur Verbesserung der Energieeffizienz ist es von Vorteil die Standbreite möglichst klein zu wählen. Dies steht jedoch im Widerspruch zur Steigerung der Stabilität, da diese von der Größe der Aufstandsfläche abhängt. Die systematische Analyse und Optimierung des Energieverbrauchs macht nicht nur solche einfachen, klaren Zusammenhänge deutlich, sondern bietet auch Potential für ganz spezielle Optimierungen. So konnte zum Beispiel bei *LAURON* ein interessanter Effekt in den Getriebestufen dazu verwendet werden den Energieverbrauch im Stand zu reduzieren. Die kinematische Optimierung hinsichtlich des Energieverbrauchs lässt sich besonders gut in einer Dynamik-Simulation umsetzen. Mit der entwickelten *RoadS* Simulation konnte z.B. erfolgreich die Kinematik systematisch angepasst werden um die Energieeffizienz im Stand zu optimieren. Anhand eines zusätzlich entwickelten Dynamikmodells konnte weiter gezeigt werden, wie die *Schrittweiten*, *Zykluszeiten* sowie Laufmuster systematisch angepasst werden können um die Energieeffizienz anzupassen. Dabei ist es wichtig zu verstehen, dass oft nicht die naheliegenden, scheinbar offensichtlichen Lösungen die richtigen Optimierungsansätze darstellen. Soll bei einem Laufroboter die Geschwindigkeit erhöht werden, ist es sinnvoll vor allem die *Zykluszeit* der Schwing-Stemm-Bewegungen zu reduzieren. Die *Schrittweite* kann auch angepasst werden, jedoch muss dies mit Bedacht gemacht werden, da allzu große Schritte eine deutlich ineffizientere Lokomotion zur Folge haben. Auch das Tripod-Laufmuster, das das schnellste aller Laufmuster für sechsbeinige Laufroboter ist, ist nicht für alle Geschwindigkeiten das effizienteste Laufmuster. Systematische Optimierungen, die auf detaillierten Dynamikmodellen basieren, erlauben es die Leistung

der Roboter gezielt zu verbessern. Der Erfolg dieser Ansätze hängt allerdings von der Güte des Dynamikmodells ab. Die Verwendung von geneigten Schwing-Stemmtrajektorien erscheint wie die Verwendung von *heterogenen Schrittweiten* zunächst wenig vielversprechend. Betrachtet man die Beinbewegungen in der Natur wie z.B. von der Stabheuschrecke, wird klar, dass dort keine zum Körper exakt parallelen Trajektorien vorkommen. In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Neigung der Trajektorien mit einem negativen Neigungswinkel einen positiven Effekt auf die Laufleistung haben kann. Weiter wurde ein Partikel-Schwarm-Optimierer (PSO) dazu verwendet die Energieeffizienz zu steigern. Dabei erlaubt dieser Ansatz auch widersprüchliche Ziele über die Fitnessfunktion gleichzeitig zu optimieren bzw. bei Bedarf dynamisch umzuschalten. Die Komplexität des PSO und dessen Abhängigkeit von exakten dynamischen Modellen sind Nachteile, die von der Übertragbarkeit und Flexibilität des Optimierungsansatzes gut aufgewogen werden.

Insgesamt konnten die verschiedenen Optimierungen sehr unterschiedliche Ansätze aufzeigen um mehrbeinige Laufroboter zielgerichtet und systematisch zu verbessern. Die Verfahren und Methoden lassen sich z.T. direkt auf viele verschiedene Roboter übertragen bzw. können mit wenigen Anpassungen transferiert werden. Damit leistet diese Arbeit einen wichtigen Beitrag mehrbeinige Laufroboter hinsichtlich der Stabilität, Geschwindigkeit und Energieeffizienz systemunabhängig weiterzuentwickeln.

7. Evaluation anhand der Roboter LAURON IVc und LAURON V

Die Komplexität mehrbeiniger Laufroboter entsteht durch die hohe Anzahl an Freiheitsgraden, sowie das notwendige Zusammenspiel vieler Komponenten und die intensive, punktbasierte Interaktion mit dem Untergrund. Oft weichen theoretische Ergebnisse in der Praxis stark ab, da einzelne Aspekte nicht detailliert genug berücksichtigt oder modelliert wurden. Aus diesem Grund ist gerade für Laufroboter eine belastbare, aussagekräftige Evaluation besonders wichtig.



Bild 7.1.: Evaluation der Laufgeschwindigkeit mittels 2D-Linienscannern. Quelle [Hep11]

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln Analyseverfahren und Optimierungsmethoden für mehrbeinige Laufroboter entwickelt wurden, sollen diese in diesem Kapitel kritisch evaluiert werden. Zunächst werden ausgewählte Analyseverfahren untersucht und geprüft, ob diese auch nach der Implementierung die erwarteten Erkenntnisse und Einblicke ermöglichen. Dazu wird zum einen die empirische Motorstrommessung sowie die kinematische *Schrittweiten*-Analyse betrachtet. Zum anderen wird die Qualität der Analyseergebnisse mit *RoADS* kritisch bewertet. Anschließend werden ausgewählte Optimierungsmethoden wie die verbesserte Stabilität am Hang untersucht. Weiter werden die Methoden zur Verbesserung der Energieeffizienz sowie das Werkzeug der Erzeugung von adaptiven Bewegungstrajektorien evaluiert. Als Letztes wird anhand einer Augmented Reality Anwendung gezeigt wie *RoADS* zur kontinuierlichen Weiterentwicklung und Optimierung eingesetzt werden kann. Das Kapitel schließt mit einer kurzen Diskussion.

7.1. Evaluation der Analysemethoden

Die entwickelten Analysemethoden bilden die Basis dafür die mehrbeinige Lokomotion besser verstehen und untersuchen zu können. Sie erschließen zuvor nicht sichtbare Zusammenhänge und machen es möglich die Potentiale sichtbar zu machen. Die Evaluation dieser Analyseverfahren ist wichtig, da nur so gezeigt

werden kann, dass die Methoden auf reale Roboter angewandt werden können und ob die so gewonnenen Erkenntnisse wirklich einen Mehrwert darstellen. Dabei soll die Evaluation auch klären, ob die Analysen nur qualitative oder auch quantitative Aussagen möglich machen.

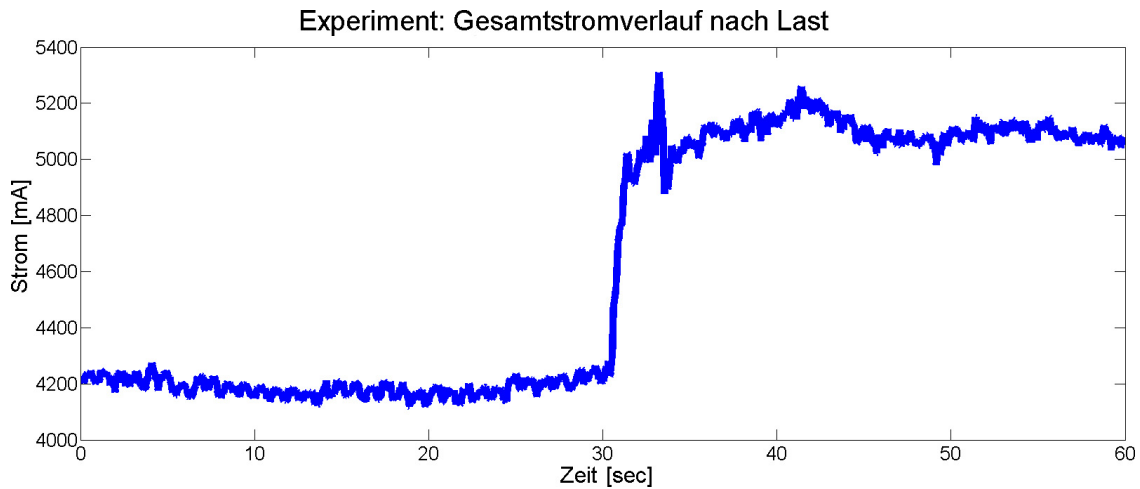


Bild 7.2.: Experiment zur Evaluation des Energieverbrauchs: Messung des Gesamtstrom über interne, kalibrierte Motorstrommessung. Nach 30 Sekunden wird eine Last von 15 kg auf *LAURON IVc* gelegt. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2012c]

Empirische Analyse: Energieverbrauch Die Messung des aktuellen Energieverbrauchs ist ein zentrales Analyseverfahren, das vor allem zur Optimierung der Energieeffizienz benötigt wird. In dieser Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt bei dem eine integrierte Motorstrommessung verwendet wurde um die individuellen Stromverbräuche aller Motoren präzise zu ermitteln [Roennau et al., 2012c]. Hierzu mussten die Messwerte wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben durch weitere Filterschritte aufbereitet und anschließend kalibriert werden. Der Energieverbrauch setzt sich bei der Evaluation mit *LAURON IVc* bzw. *LAURON V* aus den messtechnisch erfassbaren Motorströmen sowie den konstanten Strömen der Elektronik zusammen. Um aus den so ermittelten Strömen eine aktuelle Leistungsaufnahme zu ermitteln, müssen diese noch mit der Betriebsspannung von 24 V multipliziert werden. In einem ersten Evaluationsexperiment wurde ein zusätzliches Gewicht von 15 kg auf den Rücken von *LAURON IVc* gestellt und die Veränderung des Gesamtstromverbrauchs untersucht. In der Abbildung 7.2 ist gut zu erkennen, dass der Strom sprungartig um ca. 900 mA steigt. Die Messgeschwindigkeit ist schnell, so dass bei der Auswertung keine messtechnische Latenz ermittelt werden konnte.

In einem weiteren Experiment wurde mit einem externen Messgerät der Gesamtstromverbrauch des Labornetzteils, mit dem *LAURON* versorgt wird, erfasst. In der Abbildung 7.3 ist der Verlauf dieser Referenzmessung in blau dargestellt. Die interne Gesamtstrommessung ist als grüne Kurve eingezeichnet. Die beiden Kurven sind nahezu deckungsgleich und der Fehler (rote Kurve) ist somit entsprechend klein. Die Evaluation konnte zeigen, dass die entwickelte Analyseverfahren sehr gut geeignet ist um den Energieverbrauch des Roboters in Echtzeit zuverlässig zu ermitteln. Die Messgüte ist außerdem hoch genug um detaillierte Analysen vorzunehmen. Ein großer Vorteil des Ansatzes liegt darin, dass nicht nur der Gesamtstromverbrauch erfasst wird, sondern der Verbrauch jedes einzelnen Motors bzw. Gelenks für die Analysen zur Verfügung steht und so auch individuelle Belastungen identifiziert werden können. Diese empirische Analyse konnte erfolgreich auf der CLAWAR Fachkonferenz veröffentlicht werden [Roennau et al., 2012c].

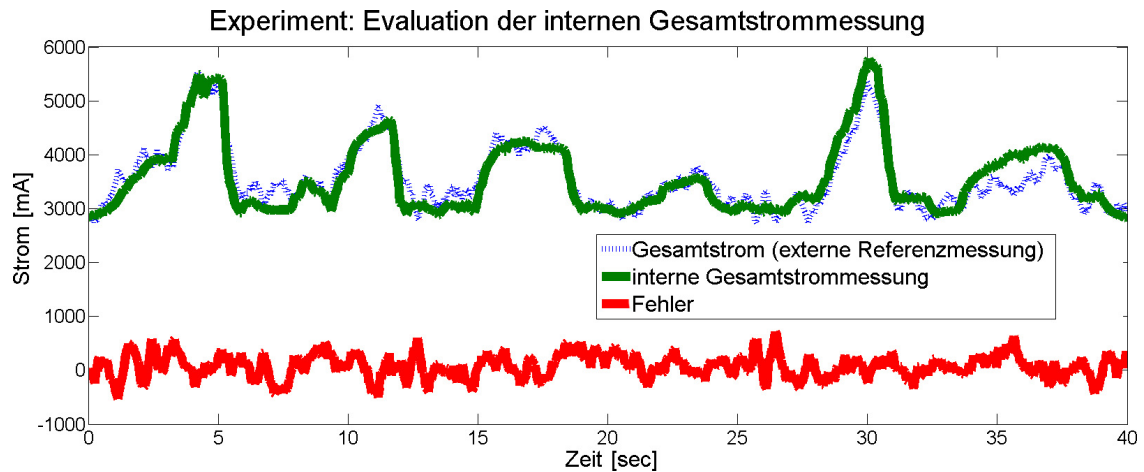


Bild 7.3.: Experiment zur Evaluation des Energieverbrauchs: Vergleich des internen Gesamtstroms mit externer Referenzmessung. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2012c]

Kinematische Analyse: Arbeitsraum Die Arbeitsraumanalysen nach *Yoshikawa* ermöglichen es die maximalen *Schrittweiten* für verschiedene Beinanstellungen zu ermitteln (siehe Abschnitt 5.2.1). Dabei entsteht eine wechselseitige Abhängigkeit der maximalen *Schrittweite* von den ROLL- und YAW-Anstellwinkeln sowie von der aktuellen Laufhöhe. In der Abbildung 7.4 ist der Verlauf der maximalen *Schrittweite* für die drei ROLL-Anstellwinkel $\Psi = 30^\circ$, $\Psi = 45^\circ$ und $\Psi = 60^\circ$ dargestellt [Roennau et al., 2013a]. Links in der Abbildung sind die Kurvenverläufe für eine Laufhöhe von 100 mm und rechts für die Laufhöhe von 200 mm zu sehen. Bei 100 mm Laufhöhe erreichen die *Schrittweiten* bei dem YAW-Winkel $\eta \simeq 45^\circ$ ein Maximum.

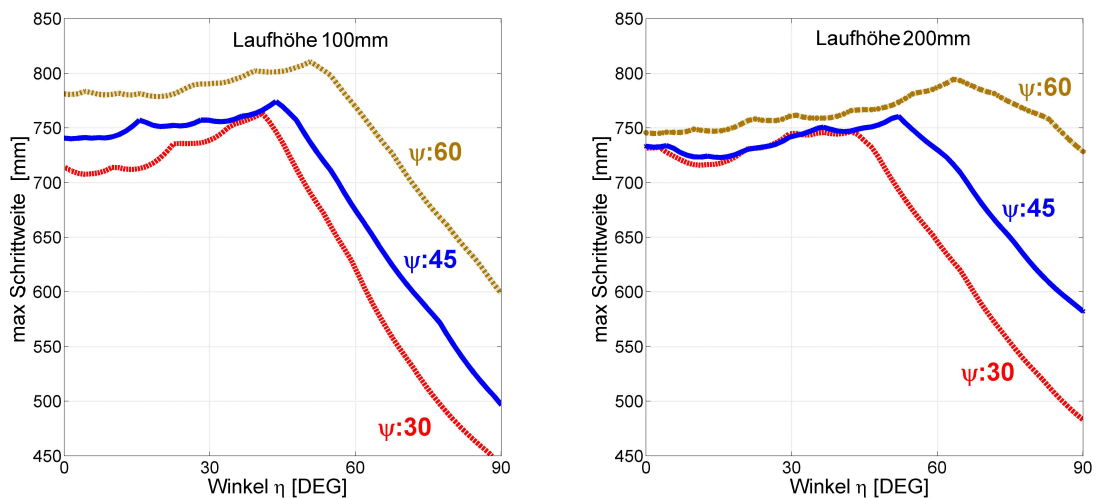


Bild 7.4.: Maximal mögliche *Schrittweite* in Abhängigkeit des YAW-Anstellwinkels η sowie dem ROLL-Anstellwinkel Ψ : (links) Laufhöhe von 100 mm, rechts Laufhöhe 200 mm. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2013a]

Dieser Effekt kann anschaulich damit erklärt werden, dass nicht mehr nur das ALPHA-Gelenk, sondern auch die BETA- und GAMMA-Gelenke für die Vorwärtsbewegung genutzt werden können. Somit könne alle Gelenke zu der maximalen *Schrittweite* beitragen. Bei einem YAW-Winkel von $\eta = 0^\circ$ leistet fast nur das ALPHA-Gelenk den Vortrieb. Wird der YAW-Anstellwinkel jedoch sehr groß $\eta > 50^\circ$ fällt die maximal mögliche *Schrittweite* schnell ab, da das ALPHA-Gelenk immer schlechter für die Vorwärtsbewegung verwendet werden kann. Bei einer Laufhöhe von 200 mm verlagert sich dieser Effekt etwas, wie

im rechten Teil der Abbildung 7.4 zu erkennen ist. Die maximale *Schrittweite* hängt hier deutlich stärker von dem *ROLL*-Anstellwinkel Ψ ab. Mit einem nur relativ kleinen Anstellwinkel $\Psi = 30^\circ$ hat das Bein bereits Schwierigkeiten den Boden zu erreichen, so dass sich die maximale *Schrittweite* auch gegenüber der Laufhöhe von 100mm sichtbar verringert. In der Abbildung 7.4 ist bei der Laufhöhe von 200mm außerdem zu sehen, dass sich die Maxima der Kurven für $\Psi = 45^\circ$ und $\Psi = 60^\circ$ deutlich weiter in Richtung großer *YAW*-Anstellwinkel verschieben. Dies liegt daran, dass bei größeren Laufhöhen auch das *DELTA*-Gelenk verwendet werden kann und bei großen *ROLL*-Winkeln neue, eher säugetierartige Trajektorienformen möglich werden. Die *Schrittweiten*-Analyse ergibt somit, dass der *ROLL*-Winkel möglichst groß gewählt werden sollte. Auch die *YAW*-Winkel sollten genutzt werden um die Beine am Körper anzuwinkeln und so die möglichen *Schrittweiten* zu vergrößern. Damit konnte gezeigt werden, dass die Arbeitsraumanalyse ein wichtiges Verfahren ist um die Kinematik eines Roboters hinsichtlich dessen maximaler Laufgeschwindigkeit zu optimieren. Die Analyseverfahren sind unabhängig von einer konkreten Kinematik und lassen sich gut auf andere Robotersysteme übertragen.

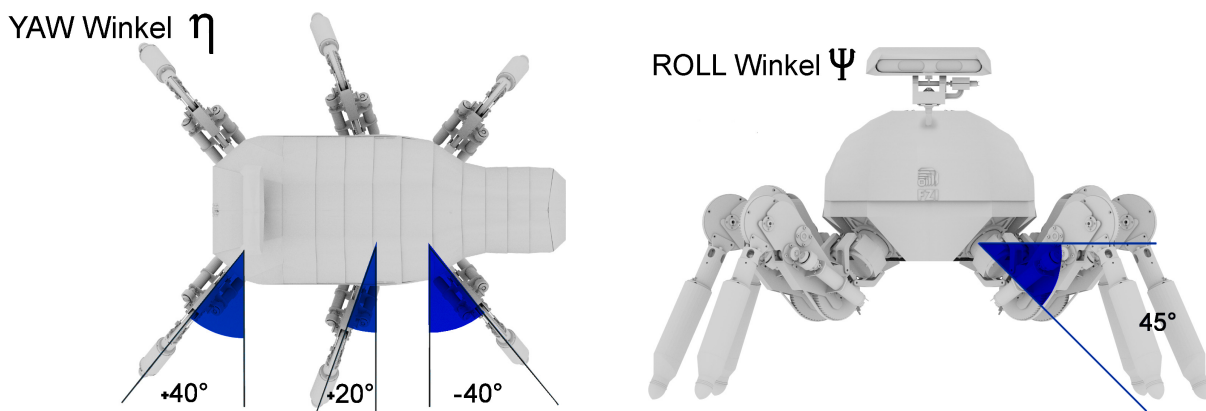


Bild 7.5.: Finale *ROLL*- und *YAW*-Anstellwinkel von *LAURON V* nach Arbeitsraumanalysen. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2013a]

Das Ergebnis dieser Analyse wurde verwendet um die *ROLL*- und *YAW*-Anstellwinkel des Laufroboter *LAURON V* während dessen Konzeption und Design festzulegen. Dabei wurde bei dem *ROLL*-Anstellwinkel nicht der größte Wert, sondern der mittlere Wert $\Psi = 45^\circ$ gewählt um die Flexibilität des Roboters sicherzustellen. Bei größeren *ROLL*-Anstellwinkeln verringert sich die maximale *Schritthöhe* aufgrund von konstruktiven Anschlägen beim Beindesign. Die *Schritthöhe* entscheidet jedoch maßgeblich wie hoch die Hindernisse sein können, die von dem Roboter überwunden werden können. Entsprechend wurde bei dem *ROLL*-Anstellwinkel ein Kompromiss gewählt. In der Abbildung 7.5 ist *LAURON V* mit dem *ROLL*-

| Anstellwinkel | LAURON V | | | Indische Stabheuschrecke | | |
|--------------------|----------|-------|--------|--------------------------|-----------|--------|
| | Vorne | Mitte | Hinten | Vorne | Mitte leg | Hinten |
| <i>ROLL</i> Ψ | +45° | +45° | +45° | +40° | +40° | +50° |
| <i>YAW</i> η | +40° | +20° | -20° | +15° | +5° | -45° |

Tabelle 7.1.: Vergleich der *ROLL*- und *YAW*-Anstellwinkel für *LAURON V* und der indischen Stabheuschrecke [52]

Anstellwinkel von $\Psi = 45^\circ$ dargestellt. Der *YAW*-Anstellwinkel wurde für die drei Beinpaare unterschiedlich gewählt. Dabei wurde versucht Anstellwinkel zu wählen, die es *LAURON V* erlauben auf dem mittleren und hinteren Beinpaar zu stehen während die vorderen Beine für Manipulationsaufgaben verwendet werden können. Die Anstellwinkel orientieren sich stark an den Ergebnissen der Arbeitsraumanalysen, bilden

jedoch auch einen Kompromiss hinsichtlich der Manipulationsanforderungen. Links in der Abbildung 7.5 sind die drei gewählten Anstellwinkel $\eta_{L1+L2} = +40^\circ$, $\eta_{L3+L4} = +20^\circ$ und $\eta_{L4+L5} = -40^\circ$ dargestellt. Die optimierten Winkel sind insgesamt den Anstellwinkeln der indischen Stabheuschrecke sehr ähnlich und somit auch biologisch plausibel (siehe Tabelle 7.1). Die systematischen Analysen und Optimierungen der Kinematik haben dazu geführt, dass die Leistungsfähigkeit von *LAURON V* deutlich gegenüber dessen Vorgänger *LAURON IVc* gesteigert werden konnte. So konnte *LAURON V* beim DLR SpaceBot Camp 2015 z.B. eindrucksvoll unter Beweis stellen, dass das System in der Lage ist sich in schwierigen Umgebungen sicher fortzubewegen. Hier konnte zudem erfolgreiche gezeigt werden, dass *LAURON V* mit den speziellen Anstellwinkeln in der Lage ist die vorderen Beine für Manipulationsaufgaben zu verwenden (siehe Abbildung 7.6).

Dynamische Analysen: Integrierte Online Simulation In Folgenden soll evaluiert werden, ob die entwickelte *RoadS* Simulation für detaillierte Laufroboter Analysen verwendet werden kann. Hierzu wurde der Laufroboter *LAURON IVc* präzise nachmodelliert [Sut12]. Die kinematischen sowie dynamischen Parameter wurden dabei exakt berücksichtigt, so dass auch der virtuelle *LAURON* ein Gewicht von 28,1 kg wie der echte *LAURON IVc* erreicht. Das entwickelte Konzept zur Messung der Kräfte an den Roboterfüßen soll anhand eines Experiments in *RoadS* evaluiert werden. In der Abbildung 7.7 sind die Messwerte für das Laufen im *Tripod* Laufmuster dargestellt. Interessant ist zum einen die Summe aller Kräfte, die als rote Kurve dargestellt wurde. Diese ergibt einen Wert von ca. 276 N, was bei einem virtuellen Gewicht von 28,1 kg zeigt, dass in der Simulation alle Kräfte korrekt erfasst werden (erwartete Gewichtskraft = $28,1 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 275,6 \text{ N}$). Zum anderen sind die einzelnen Kraftverläufe in den Beinen dargestellt. Die Beine L2 und L3 sind die mittleren Beine des Roboters, die während des *Tripods* deutlich stärker belastet sind. Sie tragen jeweils ca. die Hälfte der Gewichtskraft des Gesamtsystems, was ebenfalls gut zu den Messwerten (ca. 140 N) in der Abbildung 7.7 korreliert. Die Beine in der Schwingphase zeigen eine Bodenkontaktkraft von Null. Eine genauere Analyse des aus den Kräften ermittelten Schwerpunktes und

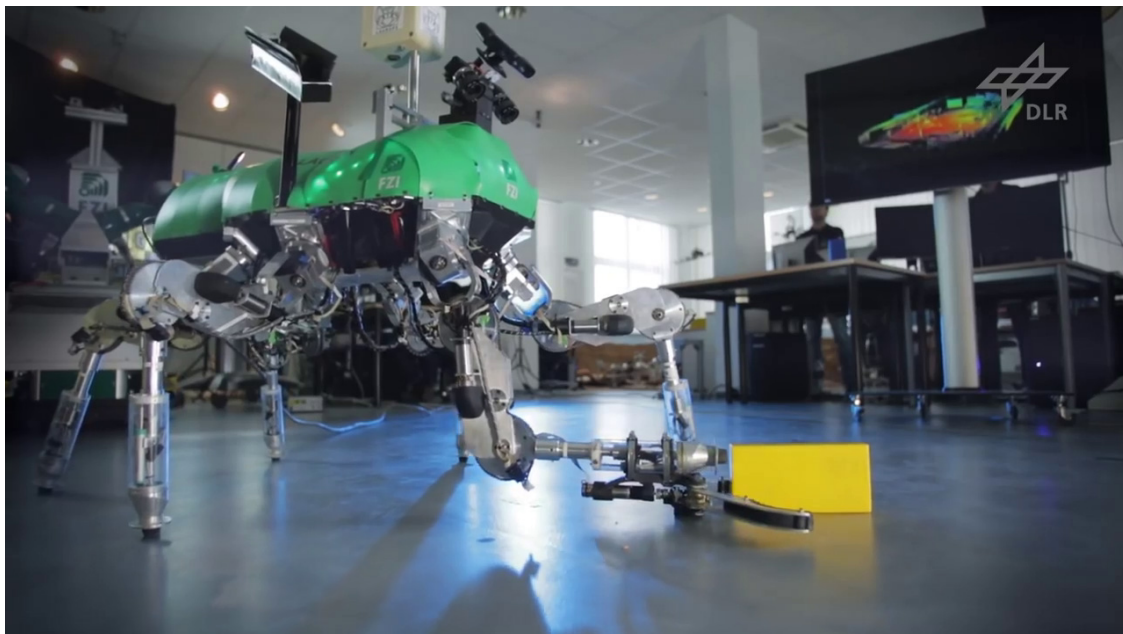


Bild 7.6.: Laufroboter *LAURON V* greift mit dem Vorderbeinen ein großes Batterieobjekt im Rahmen des nationalen DLR SpaceBot Camp 2015. Quelle [65]

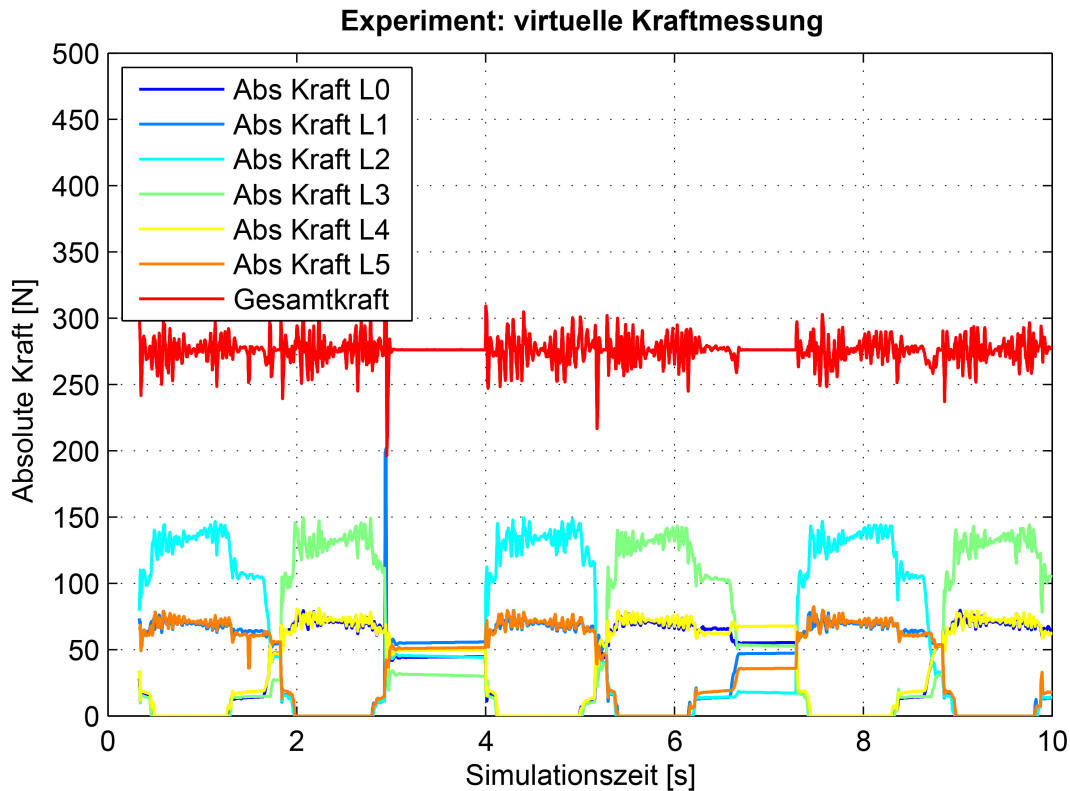


Bild 7.7.: Virtuelle Kraftmessung zur Evaluation der *RoadS*-Simulationsumgebung: Messwerte stimmen gut mit den realen Eigenschaften des Roboters überein. Quelle (modifiziert) [Sut12]

dem realen Schwerpunkt konnte zudem zeigen, dass die Messwerte sehr gut mit den realen Messwerten von *LAURON IVc* übereinstimmen. Damit konnte insgesamt belegt werden, dass *RoadS* für qualitativen und sogar für quantitative Analysen geeignet ist.

In einem weiteren Evaluationsexperiment soll untersucht werden, wie gut *RoadS* für quantitative Analysen verwendet werden kann. Hierzu wurde, wie in Abbildung 5.26 dargestellt, die *RoadS* Simulation parallel zum realen Roboter ausgeführt. Der virtuelle Roboter erhält die real gemessenen Gelenkwinkel-daten des Roboters und bewegt sich somit virtuell synchron zu dem realen Roboter. In der Abbildung 7.8 sind die virtuellen Drehmomente und die real gemessenen Motorströme des BETA-Gelenks von Bein L3 dargestellt. Für die verwendeten Gleichstrommotoren besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Drehmoment des verwendeten Motors und dessen Motorstrom. Die Abbildung zeigt, dass sich die Kurven sehr ähnlich verhalten und ein Skalierungsfaktor zwischen den beiden Kurven ermittelt werden könnte. Die Kurvenverläufe sind ähnlich, jedoch zeigen sich auch einige Abweichungen. Somit kann *RoadS* nicht für präzise, quantitative Analysen verwendet werden. Jedoch bestätigen die Kurvenverläufe nochmals die guten qualitativen Analyse-möglichkeiten.

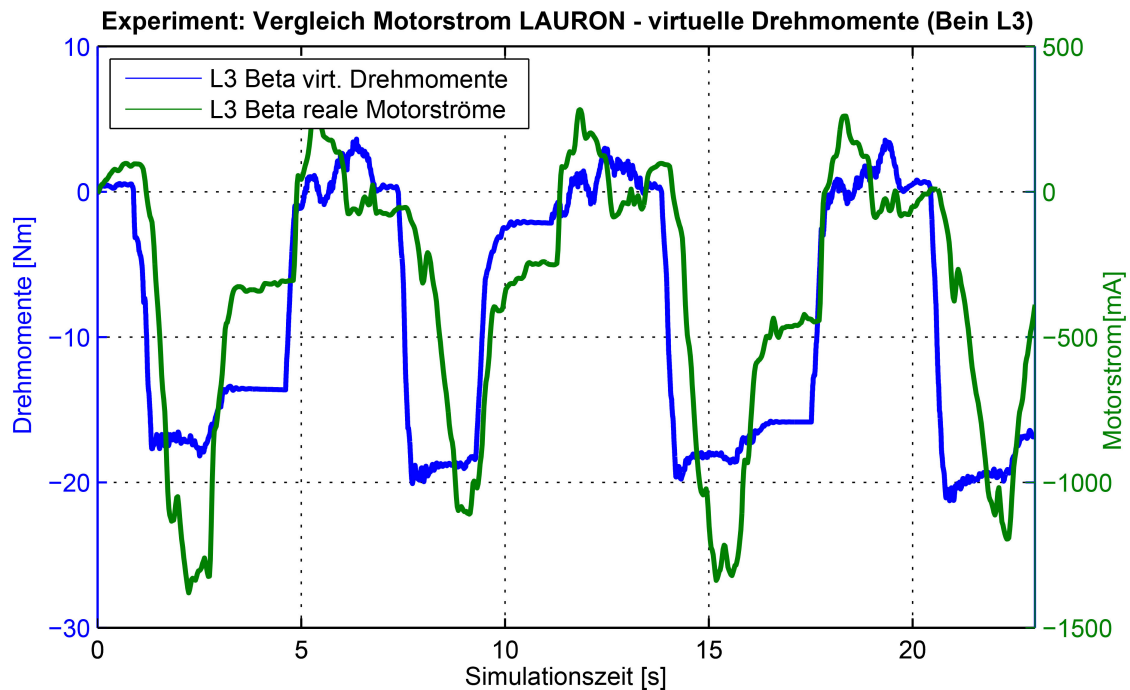


Bild 7.8.: Parallele Messung des virtuellen Drehmoments und der realen Motorströme für das BETA-Gelenk an Bein L3: Kurven zeigen große Übereinstimmungen, aber auch deutliche Unterschiede. Quelle (modifiziert) [Sut12]

7.2. Evaluation der Optimierungsverfahren

Im Rahmen dieser Arbeit soll vor allem ein Beitrag zur systematischen, zielgerichteten Optimierung von mehrbeinigen Laufrobotern geleistet werden. Entsprechend ist es wichtig kritisch zu prüfen, ob die entwickelten Methoden und Verfahren auch dazu geeignet sind reale Roboter zu optimieren. Hierzu werden die Optimierungsverfahren zur Erhöhung der Stabilität, der Geschwindigkeit und Energieeffizienz intensiv untersucht. Weiter wird evaluiert inwiefern die entwickelte Dynamik-Simulation auch auf Systemebene qualitative und quantitative Optimierungen ermöglicht. Abschließend wird die entwickelte Online-Trajektorien-generierung kritisch bewertet und anhand von Experimenten evaluiert, ob diese auch für reale Roboter eingesetzt werden kann.

Optimierung der Lokomotion: Stabilität In Kapitel 6 wurden die Fähigkeiten der reaktiven Haltungskontrollverhalten hinsichtlich der Stabilisierung eines mehrbeinigen Roboters gezeigt. Hierzu wurden insgesamt drei unabhängig Verhalten entwickelt, die die Höhe, Neigung und Position des Zentralkörpers relativ gegenüber den Beinen kontrollieren [Roennau et al., 2014d]. Die Verhalten sind in der Lage die Stabilität des sechsbeinigen Laufroboters *LAURON V* in schwierigen Umgebungen wie z.B. einem Hang sicherzustellen. In dem gezeigten Experiment (siehe auch Abbildung 6.7) konnte durch diesen Optimierungsansatz die Stabilitätsreserve deutlich erhöht werden. Das roboterunabhängige Optimierungsverfahren soll anhand der Motorströme kritisch evaluiert werden. Die Motorströme geben Auskunft darüber wie stark der Roboter während des Experiments belastet wurde und welchen Einfluss die Optimierung der Stabilität auf den Energieverbrauch hat. In der Abbildung 7.9 sind die Verläufe der Motorströme während des Experiments dargestellt. Bei diesem Experiment steht der Roboter *LAURON V* an einem Hang, dessen Steigung manuell angepasst werden kann. Zu Beginn wird die Steigung langsam auf 20° angehoben. Nach ca. 15 Sekunden

wird die Steigung nochmals auf 30° erhöht. Bereits bei einer Steigung von 20° ist zu erkennen, dass die

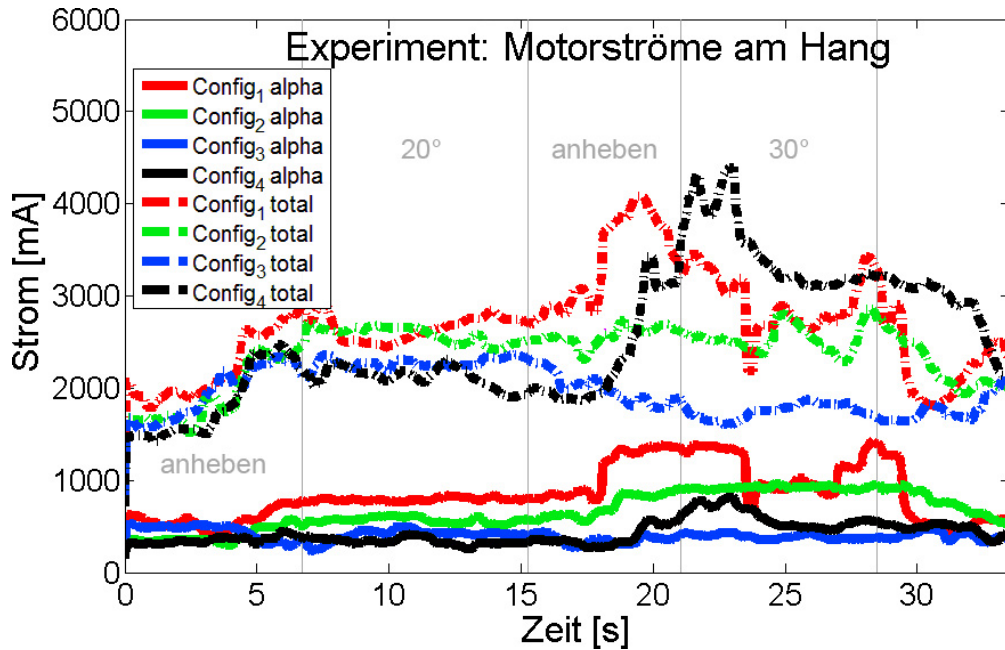


Bild 7.9.: Stromverbrauch der ALPHA-Gelenke sowie des Gesamtsystems während des Stabilitätsexperiments mit Haltungskontrollverhalten: *LAURON V* steht auf einem beweglichen Hang. Der Hang wird zunächst auf 20° , später auf 30° angehoben. Die Kurven zeigen den Stromverbrauch für verschiedene Konfigurationen (siehe Tabelle 6.2) der Stabilitätsoptimierung. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2014d]

Belastung in den ALPHA Gelenken, aber auch die Gesamtbelastung mit *Config 3* und *Config 4* niedriger ist als mit den anderen Konfigurationen (siehe Tabelle 6.2). Interessanterweise ändert sich dieser Zusammenhang bei 30° Steigung. Bei *Config 4* wird das Positionsverhalten aktiv und schiebt den Zentralkörper dichter an den Hang heran. Dadurch wird der Körper aktiv bewegt, was vor allem in den ALPHA-Gelenken zu einem erhöhten Strom- bzw. Energieverbrauch führt. Der Energieverbrauch bleibt für *Config 4* auch nach der Bewegung weiterhin höher als bei den anderen Konfigurationen. Dies lässt sich damit erklären, dass die ALPHA-Gelenke vermutlich nicht in der Lage waren den gewünschten Zielwinkel exakt anzufahren und kontinuierlich versucht haben dieses weiter zu erreichen. Die *Config 3* ohne aktives Positionsverhalten zeigt die niedrigste Belastung der ALPHA-Gelenke und erreicht außerdem den niedrigsten Gesamtenergieverbrauch. Das Positionsverhalten am Hang sollte nochmals kritisch geprüft und weiterentwickelt werden, da es einen zu hohen Stromverbrauch aufweist. Die Evaluation konnte zeigen, dass zwar die Stabilität optimiert wird, jedoch die Energieeffizienz mit diesem Optimierungsansatz noch Verbesserungspotential aufweist. Mit dem aktuellen Entwicklungsstand kann der Benutzer anhand der verschiedenen Konfigurationen zwischen der optimalen Stabilität (*Config 4*) und einer energieeffizienten Stabilität (*Config 3*) wählen.

Optimierung der Lokomotion: Geschwindigkeit und Energieeffizienz Die Energieeffizienz, aber auch die Laufgeschwindigkeit eines mehrbeinigen Laufroboters hängt von zahlreichen Faktoren ab. Im Abschnitt 6.2 sowie 6.3 wurden verschiedene Ansätze und Methoden zur Steigerung der Geschwindigkeit sowie Verbesserung der Energieeffizienz vorgestellt [Hep11]. In der Abbildung 7.10 sind die Ergebnisse zahlreicher Experimente mit dem Laufroboter *LAURON IVc* dargestellt. In Rot sind die Werte vor der Optimierung und in grün nach der Optimierung eingetragen. Auch wenn die Streuung der Energieeffizienz (hier *Specific Resistance*) in den verschiedenen Experimenten hoch ist, lässt sich dennoch eine klare Tendenz

erkennen. Durch die Optimierung des Laufmusters, der Bodenkontaktdatenfusion sowie der angepassten

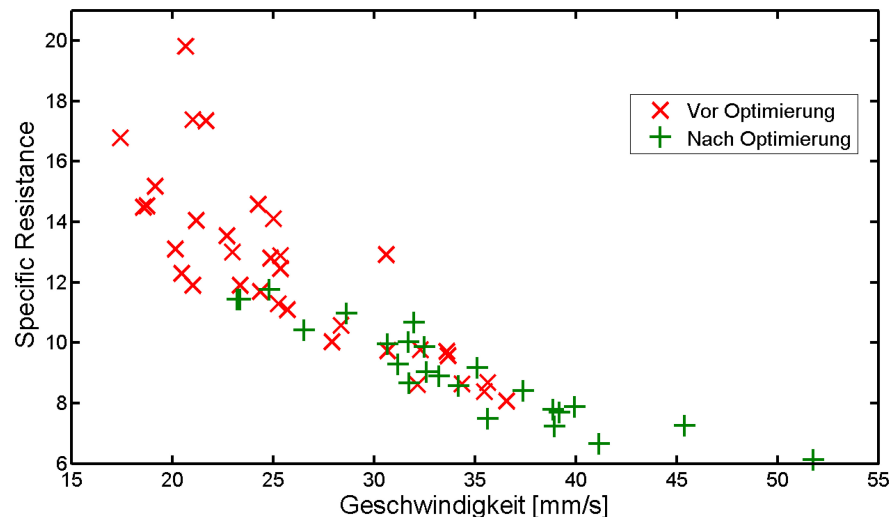


Bild 7.10.: *Specific Resistance* des Laufroboters *LAURON IVc* vor (rot) und nach (grün) der Optimierung der Energieeffizienz. Quelle [Hep11]

Standbreite und viele weiteren Aspekte konnte die Energieeffizienz deutlich verbessert werden. In dieser Evaluation wurde bei der Bestimmung der *Specific Resistance* die vollständige elektrische Energie inklusive der Onboard-PCs sowie Elektronik verwendet, so dass die hier gezeigten Werte im Gegensatz zu anderen Systemen relativ hoch erscheinen. Würde die rein mechanische Leistungsaufnahme ($P_{mech} = \dot{\omega} \cdot M$) betrachtet werden, würde der Laufroboter theoretisch im Stand keine mechanische Leistung verbrauchen, da die Winkelgeschwindigkeit $\dot{\omega} = 0$ ist. Dies stellt einen Widerspruch zu der realen Leistungsaufnahme dar, so dass die Verwendung der elektrischen Leistung aussagekräftigere Werte liefern kann. In der Abbildung 7.10 ist zu erkennen, dass die *Specific Resistance* ungefähr halbiert werden konnte. Außerdem konnte die durchschnittliche Laufgeschwindigkeit um ca. 50% gesteigert werden. Die Evaluation der Optimierungsmaßnahmen zeigt deutlich die positiven Effekte auf die Geschwindigkeit sowie Energieeffizienz und somit die Gültigkeit der entwickelten Ansätze inklusive deren erfolgreicher Implementierung.

Optimierung mittels Augmented Reality Im Kapitel 6 wurden bereits virtuelle Messwerte der *RoadS*-Simulationsumgebung mit realen Motorstrommesswerten verglichen. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Kurvenverläufe qualitative große Ähnlichkeiten aufweisen. Jedoch zeigte die quantitative Untersuchung auch, dass zwischen der Simulation und dem realen System signifikante Unterschiede nachweisbar sind. Um die dynamischen Simulationsumgebung nicht nur auf der Detailebene der Motorströme, sondern auch auf Systemebene mit dem realen Roboter vergleichen zu können, wurde eine Augmented Reality Anwendung entwickelt [Sut12]. Die Abbildung 7.11 zeigt die Software-Architektur der AR-Anwendung zusammen mit der *RoadS*-Simulationsumgebung. Ganz links in der Abbildung ist der reale Laufroboter *LAURON* mit der *LauronHal*-Software (Hardware Abstraction Layer) im MCA2-Softwareframework [217] zu erkennen. Direkt rechts daneben ist die verhaltensbasierte MCA2 Steuerungssoftware dargestellt, die zum einen die Steuersignale an den realen Roboter, aber auch an die virtuelle Robotersimulation schickt (*LauronSimulHal*). Die verhaltensbasierte Robotersteuerung erhält die realen Sensordaten von *LAURON* (mehr Details zur verhaltensbasierten Robotersteuerung können der folgenden Arbeit entnommen werden [Kerscher et al., 2008a]). Die eigentliche *RoadS*-Simulationsumgebung wird auf dem unabhängigen Simulation Host ausgeführt, ver-

7. Evaluation anhand der Roboter LAURON IVc und LAURON V

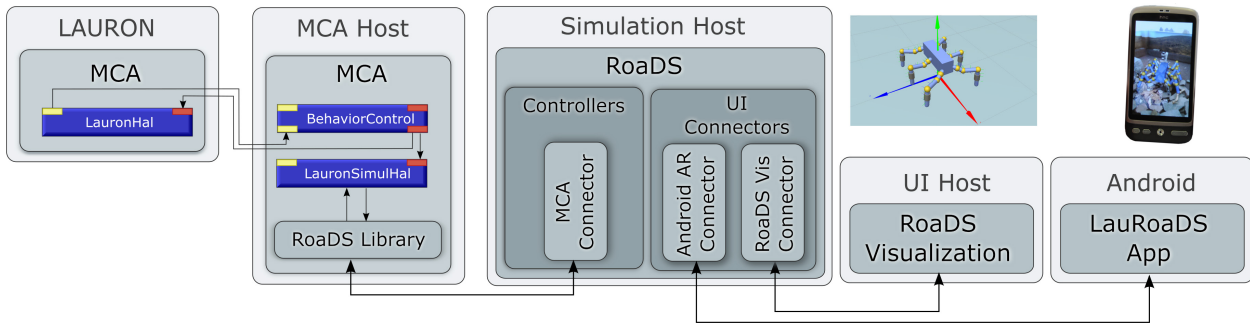


Bild 7.11.: Konzept bzw. Systemarchitektur der Augmented Reality Anwendung, die zur Evaluation der *RoaDS*-Simulationsumgebung entwickelt wurde. Quelle (modifiziert) [Sut12]

wendet aber die identischen Steuersignale wie der reale Roboter. Rechts in der Abbildung 7.11 sind das reguläre User Interface (UI) sowie die LauRoADS App dargestellt. Diese App wird auf einem handelsüblichen HTC Smartphone mit einem Android Betriebssystem ausgeführt. Die App nutzt eine markerbasierte Lokalisierung (Vuforia Tracking System [107]) um die halbtransparente Visualisierung des virtuellen, simulierten Roboters exakt über den realen Roboter zu positionieren. Für dieses Tracking wurde das Foto einer Steinlandschaft als Marker eintrainiert, ausgedruckt und neben den Laufroboter *LAURON IVc* gelegt. In der Abbildung 7.12 ist das halb transparente Overlay gut zu erkennen. Diese einfache, klare Darstellung



Bild 7.12.: Die Augmented Reality Darstellung auf dem Smartphone erlaubt es den virtuellen, simulierten Roboter direkt mit dem realen System zu vergleichen. Quelle [Sut12]

ermöglicht den direkten Vergleich der dynamischen Simulation mit dem realen Roboter *LAURON IVc*. Die Leistungsfähigkeit der Simulation kann hinsichtlich der Simulationsgeschwindigkeit als sehr hoch eingestuft werden. Die zeitliche Verzögerung zwischen dem augmentierten Roboter und dem realen Roboter ist auch während der Laufbewegung sehr klein. Das virtuelle Wettrennen in Abbildung 7.13 konnte erfolgreich genutzt werden einen Softwarefehler in der verhaltensbasierten Robotersteuerung zu finden. Das Zurückfallen des Roboters beim Lastwechsel von einer Tripod-Beingruppe zu der anderen Beingruppe wurde vorher auf vorhandenes Spiel in den Spindelgetrieben zurückgeführt. Da jedoch auch der virtuelle Roboter die gleichen Bewegungen zeigte, musste dieser Effekt auf die verhaltensbasierte Robotersteuerung zurück zu führen sein. Der Fehler konnte dank der Augmented Reality (AR) Anwendung gefunden und schnell behoben werden. Ansonsten sind die Bewegungen des virtuellen und realen Roboters äußerst synchron. Erst nach einigen Schritten fällt der reale Roboter leicht zurück, was vermutlich auf den in der Simulation nicht



Bild 7.13.: Evaluation anhand eines virtuellen Wettrennens zwischen der dynamischen Simulation und dem realen Roboter. Quelle [Sut12]

perfekt simulierten Schlupf der Gummi-Füße zurückzuführen ist. Die Evaluation der dynamischen Simulationsumgebung mittels AR kann genutzt werden um beim Debugging komplexer Systeme zu unterstützen. Weiter belegt die Evaluation, dass *RoadS* gut eingesetzt werden kann um die Lokomotion von mehrbeinigen Laufrobotern zu analysieren und systematisch zu optimieren.

Optimierung der Lokomotion: Adaptive Bewegungstrajektorien Die entwickelte mathematische Repräsentation bildet die Basis für die flexiblen, adaptiven Bewegungstrajektorien (siehe Abschnitt 5.2.3). Die Verwendung der drei Beziérkurve mit den speziell gewählten Gradient- und Shape-Punkten erlaubt es nahezu beliebige, freie Formen als Bewegungstrajektorie zu wählen. Das interaktive Tool zur Anpassung der Bewegungstrajektorien wurde im Abschnitt 6.2 im Detail vorgestellt. Dabei erlaubt das Konzept Trajektorien für vier-, sechs- und achtbeinige Laufroboter mit Beinkinematiken mit bis zu 5 Gelenken pro Bein zu verwenden. Die numerische, inverse Kinematik erlaubt es für alle diese Varianten freie und flexible Bewegungstrajektorien zu erstellen und online anzupassen. Zur Evaluation der entwickelten mathematischen Repräsentation wurde der Laufroboter *LAURON IVc* verwendet [Roennau et al., 2014a]. Die mathe-

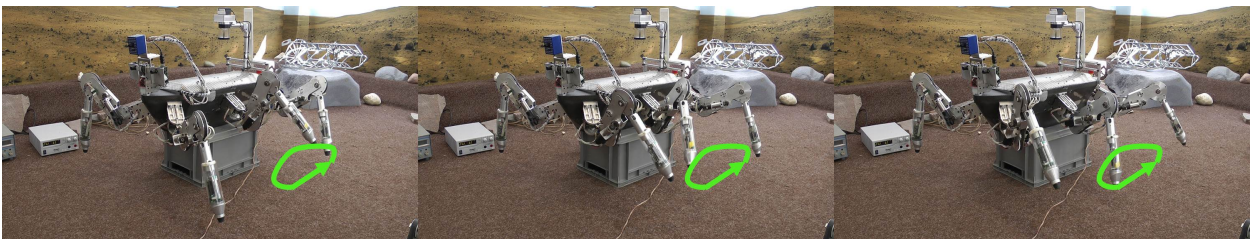


Bild 7.14.: Evaluation der interaktiven Bewegungstrajektorien mit dem sechsbeinigen Laufroboter *LAURON IVc*. Quelle [Roennau et al., 2014a]

matische Repräsentation der Bewegungstrajektorien konnte auch auf dem realen Roboter fließende, glatte Trajektorien erzeugen. Weiter konnte gezeigt werden, dass diese Trajektorien während des Laufens online angepasst werden können. In der Abbildung 7.14 ist ein Auszug aus einem Video der realen Experimente mit *LAURON IVc* zu sehen. Die gewählte biologisch inspirierte Bewegungstrajektorie wird von dem Roboterbein exakt ausgeführt (siehe grünes Overlay zur Orientierung). Das entwickelte Optimierungswerkzeug funktioniert somit nicht nur in der Simulation, sondern kann auch erfolgreich mit realen Robotersystemen eingesetzt werden. Die dynamische Anpassung sowie freie Form der Bewegungstrajektorien bietet Potential für weitere, zukünftige Optimierungen.

7.3. Diskussion

Eine kritische Evaluation ist wichtig um neue Konzepte und Hypothesen zu beweisen um deren Relevanz für ein Forschungsfeld bewerten zu können. Gleichzeitig bietet sie aber auch die Möglichkeit die entwickelten

Ansätze anzupassen und zu verbessern. Die Evaluation in dieser Arbeit basiert vor allem auf realen Experimenten mit den sechsbeinigen Laufrobotern *LAURON IVc* sowie *LAURON V*. Dabei stellt der erfolgreiche Betrieb des Roboters *LAURON V* im Grunde schon einen Teil der Evaluation dar, da dieser an vielen Stellen anhand der hier entwickelten Analysen und Optimierungsverfahren konzipiert und umgesetzt wurde.

Analyse der Motorstrommessung Die Untersuchung der entwickelten Motorstrommessung zeigt, dass diese präzise, nahezu verzögerungsfrei und zuverlässig die wichtigen Daten liefert. Jedoch basiert die Gesamtstrommessung z.T. auf Schätzwerten, da nur die Ströme der Motoren erfasst werden. Unterschiedliche Rechenlasten der PCs oder defekte Elektronikkomponenten könnten Stromschwankungen erzeugen, die bisher messtechnisch nicht erfasst werden können. Eine einfache Gesamtstrommessung könnte diese Effekte besser erfassen. Andererseits bietet die detaillierte Messung aller Motorströme die Möglichkeit Belastungen pro Gelenk und pro Bein zu erfassen. Diese Daten könnten in Zukunft z.B. auch dafür verwendet werden mechanische Defekte oder Motorausfälle selbstständig aus den kontinuierlichen Messdaten zu erkennen. Die Evaluation hat insgesamt gezeigt, dass die Güte der Motorstrommessung in der aktuellen Form hervorragend dafür geeignet ist die Lokomotion von Laufrobotern zu analysieren.

Analysen des Arbeitsraums Die komplexen Analysen des Arbeitsraums ermöglichen einen tiefen Einblick in die kinematischen Potentiale eines Laufroboters. Allerdings sind die Darstellungen und Analyseergebnisse nicht einfach nachzuvollziehen bzw. richtig zu interpretieren. Die entwickelte systematische Auswertung und Reduktion auf Schnittbilder erleichtert die Verwendung dieser Analysemethoden. Bei der Auswahl der möglichen Beinanstellungen für den Laufroboter *LAURON V* konnten spannende Zusammenhänge und Erkenntnisse gewonnen werden. Das finale Design von *LAURON V* folgt nicht vollständig den Analyseergebnissen, sondern stellt vielmehr einen Kompromiss aus zahlreichen Anforderungen dar. Dennoch konnte nur durch die erfolgreichen Arbeitsraumanalysen eine fundierte Entscheidung getroffen werden. Die Leistungsfähigkeit des Laufroboters *LAURON V* beweist, dass die Wahl der optimierten Anstellwinkel richtig war. Außerdem zeigt der Blick in die Natur, dass die Winkel starke Ähnlichkeiten zu den Anstellwinkeln der Stabheuschrecke aufweisen. Auch dies gilt als Beleg für die hohe Qualität der entwickelten Analysemethoden.

Analysen mit Online-Simulation *RoadS* ermöglicht die Analyse von komplexen Laufrobotern in virtuellen, simulierten Experimenten. Mit dem digitalen Zwilling können Analysen schneller durchgeführt werden und unter gleichbleibenden Bedingungen beliebig oft wiederholt werden. Außerdem können deutlich gefährlichere, belastendere Experimente zur Evaluation verwendet werden. Gleichzeitig entstehen hierdurch deutlich niedrige Kosten und Aufwände bei der Durchführung der Experimente. In der Evaluation konnte gezeigt werden, dass die virtuellen Ergebnisse in die Realität übertragen werden können. Allerdings sind quantitative Aussagen nur teilweise möglich. Qualitative Analysen zeigen hingegen eine sehr gute Übereinstimmung mit realen Referenz-Untersuchungen.

Optimierung der Stabilität Die entwickelten reaktiven Verhalten zur Verbesserung der Laufroboterstabilität in schwierigem Gelände erhöhen die Autonomie des Roboters. Ihr redundanter, unabhängiger Charakter erlaubt es die Verhalten auch nur selektiv einzusetzen. Die Evaluation erfolgte anhand einer Untersuchung der Gelenkbelastungen. So konnten die Effekte der Stabilitätsoptimierung auch hinsichtlich ener-

getischer Aspekte betrachtet werden. Überraschenderweise erreichte die Kombination an Verhalten mit der höchsten Stabilität nicht die beste Energieeffizienz. Dies liegt an der Konzeption des Regleransatzes im Positionsverhalten und sollte in Zukunft korrigiert werden. Dennoch erreichen die Haltungskontrollverhalten gute Ergebnisse hinsichtlich der Stabilität und Energieeffizienz. Durch die gezielte Auswahl der Verhalten kann der Anwender zwischen der maximalen Stabilität und einer energieeffizienten Stabilität zur Laufzeit wählen.

Optimierung der Geschwindigkeit und Energieeffizienz In der Evaluation der Energieeffizienz und Geschwindigkeit konnte gezeigt werden, wie die Kombination zahlreicher, kleinerer Optimierungen einen signifikanten Unterschied ausmachen kann. Vor allem die verbesserte Qualität der Bodenkontaktdaten hat einen großen, positiven Effekt auf zahlreiche Funktionen wie z.B. die Laufmustererzeugung. Jedoch ist in der Evaluation ebenfalls eine starke Streuung der Energieeffizienz zu erkennen. Das liegt an dem reaktiven, komplexen Charakter der verhaltensbasierten Robotersteuerung, die dafür sorgt, dass der Roboter sich oft leicht unterschiedlich verhält. Insgesamt konnten die erhöhte Geschwindigkeit sowie Energieeffizienz wesentlich zur Verbesserung der Einsatzbereitschaft bzw. Einsatzdauer des Laufroboters *LAURON* beitragen.

Augmented Reality zur systematischen Optimierung Die entwickelte AR-App für *RoadS* erlaubt es Analysen und Optimierungen auf der System-Ebene statt nur auf der Komponenten-Ebene zu betrachten. Somit können nicht mehr nur die Unterschiede zwischen den realen und simulierten Gelenkmomente analysiert werden, sondern der gesamte Roboter kann mit seinem virtuellen Pendant verglichen werden. Die Evaluation hat eine sehr hohe, gute Übereinstimmung dieser Simulation mit dem realen Robotersystem gezeigt. Diese spannende Erweiterung der *RoadS*-Simulationsumgebung erlaubt es z.B. virtuelle Rennen durchzuführen oder detailliert komplexe Zusammenhänge zu untersuchen.

Adaptive Bewegungstrajektorien zur Optimierung der Lokomotion Das entwickelte Tool zur Modellierung und Adaption der Bewegungstrajektorien bietet dem Anwender maximale Flexibilität bei der Erstellung von neuen Trajektorien. Das System ist unabhängig vom Robotertyp und unterstützt vier-, sechs- und achtbeinige Systeme mit bis zu 5 Gelenken pro Bein. Dank des hinterlegten mathematischen Modells können die Trajektorien sicher online angepasst werden, ohne kritische oder abrupte Bewegungen zu erzeugen. Eine Erweiterung dieses Ansatzes als webbasierte Anwendung wäre eine gute Möglichkeit um vielen anderen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern den Zugang zu dem System zu ermöglichen. Die Evaluation hat außerdem erfolgreich demonstriert, dass das entwickelte Gesamtsystem auch auf dem Roboter *LAURON IVc* eingesetzt werden kann und die Trajektorien live angepasst werden können.

Die Evaluation konnte anhand der beschriebenen Beispiele anschaulich zeigen, wie die entwickelten Analysemethoden und Optimierungsverfahren nachhaltig dazu beitragen werden, Laufroboter in Zukunft systematisch weiterentwickeln zu können.

8. Zusammenfassung und Ausblick

8.1. Zusammenfassung

Das mehrbeinige Laufen wirkt bei der Beobachtung von Insekten und Tieren so einfach und selbstverständlich. Gleichzeitig bietet es aber so viele konzeptionelle und robotische Herausforderungen. Dieser Widerspruch zwischen der hohen Komplexität des technischen Laufens gegenüber den natürlichen, einfachen Vorbildern fasziniert Forscher und Denker schon seit Jahrtausenden. Auch heute noch dient die Natur als Vorbild und Schablone zur Entwicklung neuer Laufroboterkonzepte. Mich hat vor allem die Vielfalt der Vorbilder in der Natur und die unzählbar große Menge an technischen Laufroboterkonzepten fasziniert. Mein primäres Ziel war es den sechsbeinigen Laufroboter *LAURON* weiterzuentwickeln und dessen Leistung systematisch zu steigern. Im internationalen Austausch mit den wissenschaftlichen Kolleginnen und Kollegen hat mich jedoch frustriert, dass es bisher keine Möglichkeit gab Fähigkeiten von einem Laufroboter auf den anderen zu übertragen. Viel schlimmer noch, es war nicht einmal möglich die Leistungen zwischen den Systemen zu vergleichen! Eine zielgerichtete, systematische Weiterentwicklung mehrbeiniger Laufroboter war somit kaum möglich. Mit diesen Erkenntnissen habe ich die zentrale Forschungsfrage dieser Dissertation entwickelt.

Wie können mehrbeinige Laufroboter trotz der großen Unterschiede in ihrer Leistungsfähigkeit systematisch und zugleich systemunabhängig analysiert und weiterentwickelt werden?

Mehrere wissenschaftlich-technische Herausforderungen können in dieser Frage identifiziert werden. In dieser Arbeit war es somit notwendig...

- ... eine Abstraktion der mehrbeinigen Lokomotion zu entwickeln
- ... das Verständnis für die zugrundeliegenden Konzepte und Gemeinsamkeiten des Laufens zu steigern
- ... die zentralen Leistungskriterien für das mehrbeinige, robotische Laufen zu identifizieren
- ... übertragbare Analyse- und Bewertungsverfahren hinsichtlich der Leistungskriterien zu entwickeln
- ... systemunabhängige Optimierungsverfahren zu konzeptionieren und zu evaluieren

Alle Herausforderungen konnten erfolgreich adressiert werden. Die notwendige Abstraktion konnte durch ein auf die wesentlichsten Lokomotionskenngrößen reduziertes Lokomotionsmodell erreicht werden. Die Konzeption und Entwicklung dieses Modells bietet einen tiefen Einblick in die zentralen Gemeinsamkeiten der mehrbeinigen Lokomotion. Dieser Einblick verbessert grundlegend das Verständnis für mehrbeinige Lokomotionskonzepte und kann sogar verwendet werden Tiere, Insekten und Spinnen zu untersuchen. Bei der Entwicklung neuer Laufroboter sowie dem anstehenden Transfer dieser Systeme in reale Anwendungen ergeben sich stets wiederkehrende Herausforderungen. Anhand der abgeleiteten Anforderungen konnten die wichtigsten, systemunabhängigen Leistungskenngrößen (Key Performance Indikatoren) identifiziert

werden: Stabilität, Geschwindigkeit und Energieeffizienz. Auf Basis des abstrahierten Lokomotionsmodells konnten drei neue Laufroboter-Metriken entwickelt werden, die diese zentralen Leistungskriterien vergleichbar machen. Die systemunabhängigen Analyseverfahren basieren auf diesen Metriken und erlauben eine roboterunabhängige Bewertung sowie Identifikation von *Best Practices*. Die auf diesen Analysen aufbauenden Optimierungsverfahren sind in der Lage die Leistungsfähigkeit mehrbeiniger Laufrobotern nachweislich erfolgreich zu steigern. Damit konnte die schwierige Forschungsfrage, wie für mehrbeinige Laufroboter eine systemunabhängige Leistungssteigerung erreicht werden kann, anhand der wissenschaftlichen Beiträge dieser Arbeit (Metriken, Analysen, Optimierungen) klar beantwortet werden.

Das Vorgehen im Rahmen dieser Arbeit kann wie folgt zusammengefasst werden.

Nach der Einleitung wurden im Kapitel 2 **Mehrbeiniges Laufen in der Natur** zunächst verschiedene Ansätze zur Klassifikation des mehrbeinigen Laufens entwickelt. Diese Taxonomien bilden einen wichtigen, ersten Schritt um Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede bei der Lokomotion sichtbar zu machen. Weiter wurden die wichtigsten Grundlagen vorgestellt, die es erlauben nicht nur diese Arbeit besser zu verstehen, sondern auch den Zugang zu weiteren Forschungsergebnissen aus der Domäne erleichtern. Abschließend wurden Erkenntnisse aus der Biologie zu faszinierenden Skalierungseffekten bei natürlichen, mehrbeinigen Vorbildern diskutiert. Zahlreiche Untersuchungen konnten z.B. mit der *Froude Number* zeigen, dass es überraschenderweise arten- und beinunabhängige Gemeinsamkeiten bei der mehrbeinigen Lokomotion gibt.

Im Kapitel 3 **Stand der Forschung im Bereich mehrbeiniger Laufroboter** wird gezeigt, dass das Interesse für das technische, mehrbeinige Laufen bis in die Antike zurückreicht. Ein kurzer Überblick über die Vielfalt moderner Laufroboter macht deutlich wie schwierig es ist, die verschiedenen Systeme hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit vergleichbar zu machen. Ziel der Arbeit ist jedoch nicht nur die Vergleichbarkeit zu verbessern, sondern vor allem Methoden zu entwickeln, die eine roboterunabhängig Optimierung ermöglichen. Hierfür werden zahlreiche Ansätze aus der Literatur vorgestellt und bewertet. Neben biologisch inspirierten Ansätzen werden auch klassische Optimierungsverfahren sowie fortschrittliche Regelungsstrategien untersucht. Die meisten Methoden konzentrieren sich jedoch auf konkrete Roboter und können nur schwer auf andere Systeme übertragen werden. Diese Erkenntnisse motivieren die weiteren Untersuchungen zu verschiedenen Laufrobotermetriken im nächsten Kapitel.

Das Kapitel 4 **Modellierung des mehrbeinigen Laufens und Entwicklung geeigneter Metriken** befasst sich zunächst intensiv mit den Vor- und Nachteilen von Stabilitäts-, Geschwindigkeits- und Energiemetriken aus der Literatur. Nachdem die Schwachstellen dieser Metriken identifiziert wurden, wurde ein unabhängiges, abstraktes Lokomotionsmodell auf Basis des Schwerpunktes, der Laufgeschwindigkeit, der Fußpunkte sowie dem Einfluss externer Störkräfte entwickelt. Dieses Modell bildet die Grundlage für die neu entwickelten Metriken, dessen Merkmale im Folgenden kurz zusammengefasst werden sollen. Die *Distance Force Stability Measure (DFSM)* ist eine Erweiterung der *Force Angle Stability Measure (FASM)*. Im Gegensatz zu dieser wird der Kippwinkel und der resultierende Kraftvektor unabhängig voneinander als gewichtsunabhängige, *geometrische Stabilität* und gewichtsabhängige, *kraftbasierte Stabilität* betrachtet. Die zusätzliche Normierung des Kippwinkels erlaubt die bessere Interpretation der Metrik. Die *DFSM* besteht im Gegensatz zu den meisten anderen Stabilitätsmetriken aus zwei Werten und erlaubt jederzeit die Unterscheidung einer relativen sowie absoluten Stabilität. Die *Normalised Walking Velocity (NWW)* verwendet zur Normierung der Geschwindigkeit die Ausdehnung der modellbasierten, erweiterten Aufstandsfläche. Somit sind nicht nur die Beinlänge, sondern auch die Ausdehnung des Lokomotionsapparates implizit berücksichtigt. Da die erweiterte Aufstandsfläche sich während des Laufens in Abhängigkeit der *Schrittweite*

verändern kann, ist auch die Normierungsbasis der *NWV* veränderlich. Diese Adaptivität der Metrik kann vorteilhaft zur kontinuierlichen Optimierung der Lokomotion verwendet werden. Die *Cost per Step (CpS)* ist eine Weiterentwicklung der *Cost of Transport* um den Eigenschaften mehrbeiniger Laufroboter gerecht zu werden. Als normierende Distanz wird die eindeutige *Schrittweite* verwendet und die zu normierende Energie ist ebenfalls klar definiert. Die Energie wird anhand der Ruheenergie im Stand normiert um gezielt die Lokomotionsleistung besser bewerten zu können. Die zweite Energiemetrik *System Modesty (SM)* betrachtet den normierten Energieverbrauch im Stand und berücksichtigt die Effizienz der kinematischen Strukturen sowie Aktuatoren. Zusammen bilden die modellbasierten Metriken ein wichtiges Werkzeug um sehr unterschiedliche Laufroboter hinsichtlich ihrer Lokomotionsleistung untersuchen zu können.

Die entwickelten Analyseverfahren und Werkzeuge werden im Kapitel 5 **Analysen und Bewertungskriterien** detailliert vorgestellt. Diese Analysen erlauben es nicht nur bestehende Laufroboter zu untersuchen, sondern auch den Entwicklungsprozess neuer Roboter kritisch zu begleiten. Die Verfahren ermöglichen einen Blick in das Innere des Roboters und so Rückschlüsse auf ansonsten unsichtbare Zusammenhänge zu ziehen. Die empirischen Analysen konzentrieren sich darauf wichtige Kenndaten wie den beweglichen Schwerpunkt, den aktuellen Energieverbrauch sowie externe Kräfte zu ermitteln. Je besser und präziser diese Daten erfasst werden können, desto besser können sie von späteren Verfahren verwendet werden um die Lokomotionsleistung zu optimieren. Die kinematischen Analysen basieren auf umfangreichen Arbeitsraumanalysen, die vor allem die Erreichbarkeit der Beine bewerten. Die entwickelten Ansätze berücksichtigen aus Komplexitätsgründen nicht die Drehmomentbelastungen der Motoren, können aber dennoch zuverlässig die *Schrittweiten* verschiedener Kinematiken optimieren. Die guten, späteren Evaluationsergebnisse hinsichtlich der *Schrittweiten-Optimierung* belegen außerdem, dass der Verzicht auf die Drehmomentbetrachtung sinnvoll war. Die Beinbewegungstrajektorien können dank einer flexiblen, mathematischen Modellierung mittels Beziérkurve während der Lokomotion angepasst werden. Somit können diese Trajektorien effizient und kontinuierlich optimiert werden. Die neu entwickelte Dynamiksimulation für Laufroboter *RoaDS* kann dazu verwendet werden wiederholbare, systematische Versuche mit den unterschiedlichsten Laufrobotern durchzuführen. Außerdem können so ansonsten zu gefährliche oder belastenden Versuche problemlos virtuell durchgeführt werden. Um in *RoaDS* nicht nur rein simulative Daten verwenden zu müssen, wurde eine Schnittstelle für *LAURON* entwickelt, die eine transparente, parallele Simulation mit realen Daten erlaubt (digitaler Zwilling).

Die entwickelten Optimierungsverfahren aus dem Kapitel 6 **Optimierung von mehrbeinigen Laufvorgängen** können in zwei unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden: kinematische Optimierungen und Anpassung der Lokomotionsparameter. Der entwickelte genetische Algorithmus kann mehrbeinige Laufroboterkinematiken anhand einer zuvor gewählten Fitnessfunktion effektiv optimieren. Um die Konvergenz des Verfahrens zu erhöhen, wurden geschickte Annahmen über den Suchraum vorgenommen. Das Ergebnis jedes Evolutionsschrittes (neue Roboterkinematik) wird in der Dynamiksimulation anhand der Fitnessfunktion bewertet. Neben dezentralen, reaktiven Verhalten, die die Stabilität kontinuierlich optimieren, wurde ein Partikel-Schwarm-Optimierer (PSO) entwickelt, der die zur Verfügung stehenden, redundanten Freiheitsgrade aktiv ansteuert und so die Laufroboterstabilität verbessert. Die Laufgeschwindigkeit kann kinematisch über die Anstellwinkel der Beine und die daraus resultierenden maximalen *Schrittweiten* erhöht werden. Auf Basis detaillierter Arbeitsraumanalysen kann so das volle Potential der untersuchten Beinkinematik optimal genutzt werden. Für jeden Laufroboter ist es vorteilhaft Laufmuster an mögliche Eigenheiten anzupassen, umso die Geschwindigkeit weiter zu steigern. *Heterogene Schrittweiten*, also unterschiedlich große *Schritt-*

weiten der Vorder- und Hinterbeine, sind eine einfache Möglichkeit, um die in der Biologie weit verbreitete Funktionstrennung der Beine zu ermöglichen. Auch wenn die dadurch auftretenden, internen Verklemmungen zunächst ineffizient erscheinen, konnte gezeigt werden, dass so sowohl die Geschwindigkeit als auch die Energieeffizienz gesteigert werden kann. Diese Energieeffizienz lässt sich außerdem weiter kinematisch optimieren, indem der Roboter möglichst schmal steht und läuft. Die verkleinerten Hebelarme reduzieren die Motormomente, leider aber auch die Stabilität durch die verkleinerte Aufstandsfläche. Systematische Untersuchungen anhand der Dynamikmodelle haben identifiziert, dass es von Vorteil ist, die Geschwindigkeit vor allem über eine kürzere Zykluszeit zu erhöhen. Im Gegensatz zu vielen Laufrobotern sind bei den biologischen Vorbildern die Schwing-Stemm-Bewegungen in der Regel nicht parallel zur Hauptachse des Zentralkörpers. In dieser Arbeit wurden geneigte Schwing-Stemm-Trajektorien entwickelt, die einen positiven Effekt auf die Energieeffizienz haben. Jedoch muss bei dieser Optimierung iterativ mit Hilfe der entwickelten Analysen geprüft werden, welcher Winkel zu wählen ist, da nicht alle Anstellwinkel eine Steigerung der Effizienz zur Folge haben.

Im Kapitel 7 **Evaluation anhand der Roboter LAURON IVc und LAURON V** wurde erfolgreich gezeigt, dass die Analysen und Optimierungsverfahren nicht nur konzeptionell ausgereift sind, sondern auch in der Praxis wertvolle Ergebnisse liefern. Die Experimente der Evaluation wurden mit den Laufrobotern *LAURON IVc* und *LAURON V* durchgeführt. Bei der Konzeption und Entwicklung des Laufroboters *LAURON V* wurden viele Analysen und Optimierungsverfahren erfolgreich eingesetzt. Somit wurde neben der Lokomotionsleistung des bestehenden Roboters *LAURON IVc* auch der Entwicklungsprozess des Roboters *LAURON V* mit dieser Arbeit erfolgreich optimiert. Die vorgestellte Motorstrommessung zeigt in der Evaluation eine hervorragende Übereinstimmung mit der Referenzmessung. Die mittels Arbeitsraumanalysen optimierten Anstellwinkel konnten die *Schrittweiten* von *LAURON V* erfolgreich vergrößern und so dessen Geschwindigkeit steigern. Außerdem stellte sich bei der Optimierung ein Ergebnis ein, das große Ähnlichkeit mit den Anstellwinkeln der Stabheuschrecke aufweist. Diese Übereinstimmung ist ein weiterer Beleg für die hohe Güte der Optimierungsverfahren. Der Vergleich des virtuellen Roboters in *RoadS* mit realen Messdaten hat gezeigt, dass die simulierten Daten gut zur qualitativen Analyse verwendet werden können. Eine quantitative Bewertung sollte jedoch weiterhin mit realen Versuchen vorgenommen werden. Die entwickelten, reaktiven Haltungskontrollverhalten konnten auch bei schwierigen Experimenten am Hang den Roboter erfolgreich stabilisieren. Allerdings zeigte sich auch, dass die höchste Stabilität im Widerspruch zur Energieeffizienz steht. Zahlreiche kleinere Optimierungen konnten die Energieeffizienz dennoch merklich verbessern und gleichzeitig die Laufgeschwindigkeit steigern. Die entwickelte Augmented-Reality-App erlaubt es dank der guten Übereinstimmung auch Konzepte und Daten auf der Systemebene zu vergleichen. Die adaptiven, online veränderlichen Trajektorien konnten problemlos auf *LAURON IVc* eingesetzt werden um dort die Beinbewegungen zielgerichtet anzupassen.

Die guten Ergebnisse der Evaluation belegen insgesamt die hohe Qualität der entwickelten Analysen und Optimierungsverfahren. Umfangreiche, detaillierte Versuche mit den realen Laufrobotern *LAURON IVc* und *LAURON V* zeigen, dass die wissenschaftlichen Konzepte implementier- und übertragbar sind. Weiter erlauben die abstrakten, modellbasierten Metriken erstmals Laufroboter unterschiedlichster Klassen zu vergleichen und bewerten. Durch die neuen Metriken, Analysen und übertragbaren Optimierungsverfahren können mehrbeinige Laufroboter unabhängig von ihrer Größe, der Beinanzahl sowie Kinematik systematisch und zielgerichtet weiterentwickelt werden. Die vorgestellten Konzepte erlauben insgesamt nicht nur die Optimierung oder Weiterentwicklung bestehender Systeme, sondern bieten auch Methoden für den ziel-

gerichteten Entwurf neuer, leistungsstarker Laufroboter wie z.B. *LAURON V* als Teil dieser Arbeit. Endlich wird es mit den Ergebnissen dieser Arbeit möglich systemunabhängige *Best Practices* zu identifizieren und auf andere Systeme zu übertragen. Die Arbeit leistet insbesondere mit der Leistungssteigerung in den Bereichen *Stabilität*, *Geschwindigkeit* und *Energieeffizienz* einen entscheidenden, wissenschaftlichen Beitrag für die Forschung im Bereich mehrbeiniger Laufroboter.

8.2. Ausblick

Aktuell sind vor allem dynamisch laufende, vierbeinige Roboter wie *ANYmal* oder *SpotMini* äußerst prominent in der Laufrobotik-Forschung. Eine spannende Ergänzung dieser Arbeit könnte es sein, stärker auf die dynamischen Eigenheiten solcher Systeme einzugehen, diese noch besser in den Methoden zu berücksichtigen und einen dynamischen Laufroboter für die Evaluation der Methoden bzw. Verfahren einzusetzen. Die entwickelten Metriken, Analysen und Optimierungen wurden roboterunabhängig konzipiert, sollten somit problemlos auf vierbeinigen Laufrobotern implementierbar sein. Für die Zukunft ist eine detaillierte Evaluation mit dynamischen, vierbeinigen Laufrobotern geplant, die diese Übertragbarkeit und Unabhängigkeit nochmals deutlich unterstreichen könnte.



Bild 8.1.: Vision: sechsbeiniger Laufroboter *LAURON* als Serviceroboter im Haushalt.

Die von Evolutionsforschern und Biologen wie Darwin beschriebenen Konzepte der *natürlichen Auslese* und *evolutionären Entwicklung* [58], sind den Ansätzen in dieser Arbeit durchaus ähnlich. Die Evolution verfolgt einen ganzheitlichen, iterativen Ansatz. Genauso lassen sich die in dieser Arbeit entwickelten Metriken, Analysen und Optimierungen iterativ und ganzheitlich auf eine Vielzahl von Robotersystemen anwenden. Aus diesem Grund ist die Beschränkung auf Systeme mit vier oder mehr Beinen aus heutiger Sicht nicht mehr notwendig. Die Metriken, Analysen und Optimierungsverfahren ließen sich durch kleinere Anpassungen auch auf zweibeinige Roboter übertragen. Weiter wäre es denkbar, die entwickelten Analysefunktionen als Webtool der Robotik-Community zur Verfügung zu stellen. Zwar sind alle Analysen detailliert beschrieben, einfache Webtools könnten die Akzeptanz dennoch weiter erhöhen. Mit Versuchs- und Kenndaten vieler verschiedener Laufroboter könnte eine öffentliche Datenbank mit abgeleiteten Leistungskenngrößen entwickelt werden. Hieraus könnte eine Art Laufroboter-Leistungskatalog extrahiert werden, der eine Konkretisierung bzw. Abbildung der Metriken und Analysen auf konkrete Leistungsklassen vornimmt. Kombiniert

mit einer Bewertung der Robustheit wäre es möglich nicht nur die Lokomotionsleistung, sondern das reale Anwendungspotential eines Laufroboters zu bewerten. Unabhängig von diesem Anschlusspotential kann die Arbeit auch jetzt schon den Austausch und die Zusammenarbeit verschiedener Forschungsgruppen stärken und fördern. Die neue, roboterunabhängige Vergleichbarkeit komplexer, sehr unterschiedlicher Robotersysteme wird dazu beitragen, zusammen mit den entwickelten Optimierungsverfahren mehrbeinige Laufroboter schneller in konkrete Anwendungen zu bringen. Die Evolution optimierte mehrbeinige Insekten und Tiere über viele Millionen Jahre hinweg zu schnellen, stabilen und extrem effizienten Systemen. In diesem Sinne sollen die in dieser Arbeit entwickelten Metriken, Analysen und Optimierungsverfahren einen Beitrag dazu leisten mehrbeinige Laufroboter Schritt für Schritt an die Leistungsfähigkeit ihrer biologischen Vorbilder heranzuführen.

A. Mehrbeiniges Laufen in der technischen Umsetzung

An dieser Stelle wird nochmals detaillierter auf die historische Entwicklung mehrbeiniger Laufroboter eingegangen. Außerdem werden ausgewählte, moderne Laufroboter vorgestellt um die Vielfalt der Systeme zu unterstreichen. Abschließend werden Anwendungsgebiete sowie erste Anwendungen für mehrbeinige Laufroboter mit konkreten Beispielen präsentiert. Dieser Anhang kann eine wichtige Hilfe dabei sein, sich einen Gesamtüberblick über die Systeme und Technologien mehrbeiniger Laufroboter zu verschaffen.

A.1. Historische Ansätze zur Realisierung des technischen Laufens

Die Entwicklung komplexer, technischer Systeme über Jahrhunderte hinweg besteht nicht nur aus Fortschritten, sondern auch aus Rückschritten und Irrwegen. In diesem Abschnitt werden ausgewählte Meilensteine verwendet um wichtige Entwicklungsschritte in der Laufroboter Geschichte zu veranschaulichen. Die präsentierten Ansätze und Konzepte leiten repräsentativ den Weg zu heutigen, modernen Laufrobotern her und können als Inspiration für neue, innovative Konzepte dienen. In diesem Abschnitt wurden die historischen Zusammenfassungen von *Silva et al.* [204], *Nonami et al.* [157], *Berns und Fiegert* [26], *Zielinska* [239], *Raibert* [175] sowie *Siciliano und Khatib* [203] berücksichtigt und um weitere Quellen ergänzt.



Bild A.1.: Mutmaßliche Rekonstruktion des hölzernen Löwen, der für den Besuch des französischen Königs im Jahr 1515 von *Leonardo da Vinci* entwickelt wurde. Quelle [210]

Bereits in einem der ältesten erhaltenen Dokumente aus Europa, der *Ilias* von *Homer*, werden die ersten Ideen für Laufroboter erwähnt. In diesem Epos von 800 v. Chr. schmiedeten die alten griechischen Götter bereits erste laufende Apparaturen [239]. Der Wunsch solche Systeme zu entwickeln ist vermutlich noch viel älter und begleitet die Menschheit schon sehr lange. Entscheidend ist, dass diese frühen, dokumentierten Visionen in der *Ilias* Wissenschaftler und Forscher über viele Jahrhunderte hinweg dazu inspirierten hat ähnliche, laufende Gerätschaften zu entwickeln. Viele Jahre später um ca. 300 v. Chr. entwickelte in Alexandria der griechische Mathematiker und Erfinder *Ktesibios* eine Vielzahl mechanischer Apparaturen, die mit Luft oder

Wasser angetrieben wurden [88]. Seine Arbeiten wurden später von *Heron* von Alexandria aufgegriffen und unter anderem in den wichtigen Schriften *Automata*, *Pneumatica* und *Metrica* zusammengefasst. Viele der Arbeiten, so auch die von *Heron*, sind von Gelehrten aus dem Nahen Osten gesammelt und ins Arabische übersetzt worden (z.B. das Buch *Kitab al-Hiyal* [66]). Aber nicht nur in Europa und dem Nahen Osten war das Interesse an intelligenten, mechanischen Konstruktionen groß. So wurde um 300 n. Chr. in China eine frühe Laufmaschine eingesetzt, die bereits bis zu 10 km mit 200-250 kg Last an einem Tag zurücklegen konnte. Entwickelt wurde sie im Auftrag des Beamten *Zhu Ge-Liang* zur Unterstützung des Militärs mit Nachschub [239]. Durch die hölzerne, laufende Mechanik war *Mu Niu Lu Ma*, wie die biologisch motivierte Laufmaschine genannt wurde, ähnlich geländegängig wie ein Pferd oder eine Kuh. Leider sind keine Zeichnungen oder detaillierte Informationen über die Konstruktion erhalten geblieben. In Europa studierte *Leonardo da Vinci* intensiv die Konstruktionen aus den alten Texten der Antike und dem Nahen Osten. Um das Jahr 1500 entwickelte *Leonardo* mehrere mechanische Systeme, die heutigen Robotern sehr ähnlich sind. Bekannt sind vor allem der mechanische Ritter und Trommler. In der Abb. A.1 ist eine Rekonstruktion eines vierbeinigen Löwen zu sehen, der von *Leonardo* für den festlichen Besuch des neuen französischen Königs in Lyon entwickelt wurde. Zahlreiche Zeugen belegen den erfolgreichen Auftritt des laufenden, hölzernen Löwen im Jahr 1515 (siehe Abbildung A.1) [150][111][210]. Detaillierte, technische Zeichnungen sind jedoch nicht überliefert. Die Rekonstruktion stützt sich auf wenige Teilskizzen und anderen Zeichnungen, die für den Bau verwendet worden sein könnten. Aber auch ohne die technischen Details ist die Entwicklung eines funktionsfähigen, vierbeinigen Laufroboters sehr beeindruckend. Es dauerte viele Jahr-

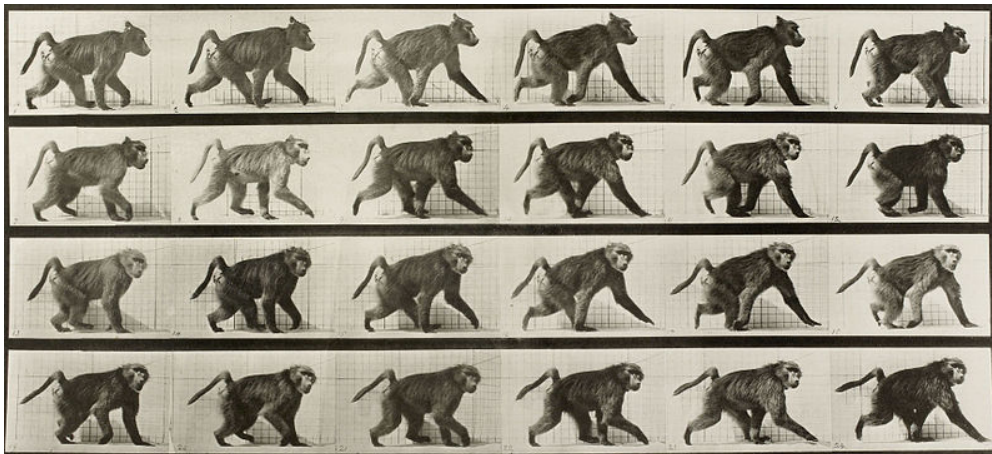
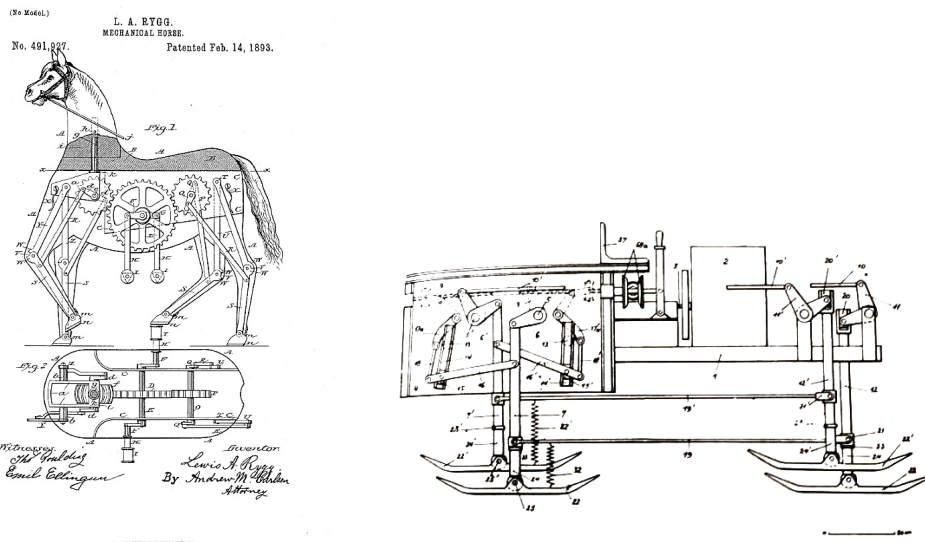


Bild A.2.: Bewegungsstudien von Eadweard Muybridge zur Erforschung der mehrbeinigen Lokomotion. Quelle [152]

hunderte bis sich die Uhrmacherkunst so weit entwickelt hatte, dass fortschrittlichere Laufroboter entwickelt werden konnten. Die mechanische Ente von *Jaques de Vaucanson* ist ein beeindruckendes Beispiel für die Fortschritte im Feinmechanik-Handwerk [62]. In dieser Zeit wurden viele mechanische Apparate entwickelt, die an heutige Roboter erinnern. Der *Schreiber*, eine mechanische Puppe, vom Schweizer Uhrmacher *Pierre Jaquet-Droz* konnte z.B. Texte schreiben und bereits durch mechanische Zapfen programmiert werden [157]. Um 1850 entwickelte der russische Mathematiker *Pafnuti Lwowitsch Tschebyschow* ein neuartiges Antriebskonzept mit dem eine drehende Bewegung in eine Laufbewegung umgesetzt werden konnte [139]. Dieses Antriebskonzept war wegweisend, da nun einfache und effiziente Laufmaschinen entwickelt werden konnten (siehe links in Abb. 3.1). Jedoch war es nicht möglich die Beine dieser Laufmaschinen einzeln anzu-steuern und auch das Drehen war nur sehr eingeschränkt möglich. Mit der Entwicklung der Dampfmaschine

stand eine neue Energiequelle zur Verfügung, die auch bald für neuartige Laufmaschinen eingesetzt wurde. Der sogenannte *Steam Man* von *Georges Moore* ist eines von zahlreichen dampfbetriebenen Systemen, das sogar auf nur zwei Beinen laufen konnte. *Moore* präsentierte den *Steam Man* in ganz Europa und faszinierte die Menschen mit dem aus dem Kopf rauchenden, zweibeinigen Laufroboter. Im Jahr 1865 konnte der in dieser Arbeit *Steam Man* bereits eine beachtliche Geschwindigkeit von ca. 14 km/h erreichen [183]. *Eadweard Muybridge* hat seine Bewegungsstudien begonnen um herauszufinden, ob es bei Pferden eine vollständige Flugphase (alle Füße gleichzeitig in der Luft) gibt. Er konnte 1872 durch aufwändige, zeitlich penibel abgestimmte Serienfotografie nachweisen, dass diese Flugphasen tatsächlich existieren [152]. Die Serienfotografien lieferten wichtige Einblicke in die tierische und menschliche Lokomotion und dienen Forschern bis heute als Basis für Analysen und Studien. Wenige Jahre später, und vermutlich durch die Arbeiten von *Muybridge* und *Tschebyschow* inspiriert, entwickelte *L.A. Rygg* sein *Mechanical Horse* - ein mechanisches Pferd (siehe Abb. A.3 links). Dieses Pferd wurde vom Reiter durch Beinkraft angetrieben und 1893 in den USA zum Patent angemeldet. Ein weiteres Patent für eine Laufmaschine meldet *Clemens Freiherrn von Bechtolsheim* im Jahr 1913 an [205]. Die in Abb. A.3 rechts dargestellte vierbeinige Laufmaschine wurde jedoch vermutlich nie gebaut. Bei den bisher vorgestellten Meilensteinen handelt es sich vor allem um Kon-



Bilb. 2. — Der Schreitwagen des Freiherrn v. Bechtolsheim. DRP 554354 aus dem Jahre 1913.

Bild A.3.: Patente mechanischer Laufmaschinen: (links) *Mechanical Horse* - ein mechanisches Pferd entwickelt von *L.A. Rygg* im Jahr 1893. Quelle [185], (rechts) Patentanmeldung eines Schreitwagens durch *Freiherrn von Bechtolsheim* im Jahr 1913. Quelle [219]

zepte, Konstruktionen und erste mechanische oder hölzernen Prototypen. Keins der bisher beschriebenen Systeme wurde hydraulisch oder elektrisch angetrieben. In der Tab. A.1 ist diese historische Entwicklung mehrbeiniger Laufroboter bis 1950 zusammengefasst.

Die moderne Phase der Laufroboter-Entwicklung begann ab den 1950er-Jahren mit der Untersuchung des mehrbeinigen Laufens in verschiedenen Forschungseinrichtungen. Diese modernen Laufroboter verwenden elektrische oder hydraulische Antriebe und nutzen elektronische Schaltungen oder später Rechnersysteme um die Bewegungen zu steuern. Einen der ersten modernen Laufroboter entwickelte *Ralph Moshier* im Jahr 1968 bei General Electric (GE) in den USA [151]. Der *General Electric Quadruped* oder auch *Walking Truck* war ein großer hydraulischer, vierbeiniger Laufroboter mit einem Gewicht von ca. 1.400 kg und einer Höhe von über 3 m. Das System verfügte über drei Gelenke pro Bein und wurde von dem menschlichen Bediener

Tabelle A.1.: Zeitstrahl: Historische Entwicklung mehrbeiniger Laufroboter bis 1950

| | |
|---------------------|--|
| ca. 800 v.Chr. | Erzählungen von Laufmaschinen: In den frühen Werken von <i>Homer</i> wird erwähnt wie griechische Götter Laufmaschinen erschaffen [239]. |
| ca. 300 v.Chr. | Bewegte mechanische Elemente: Der griechische Erfinder <i>Ktesibios</i> baut in Alexandria von Wasser angetriebene mechanische Elemente [88]. |
| ca. 300 n.Chr. | Mu Niu Lu Ma - hölzernes Lasttier: Entwicklung einer mechanischen Laufmaschine für den Transport von Nachschub für das Militär [239]. |
| 1515 | Roboter von Leonardo da Vinci: In Italien baute <i>Leonardo da Vinci</i> verschiedene Roboter: neben dem bekannten Ritter auch einen mechanischen Löwen [150][210][111]. |
| 1738 | Mechanische Ente: Während der Hochzeit der Uhrmacher entwickelte <i>Jaques de Vaucanson</i> eine beeindruckende, mechanische Ente [62]. |
| 1850 | Antriebskonzept für mehrbeinige Laufroboter: In Russland entwickelte <i>Tschebyschow</i> ein wegweisendes Antriebskonzept um Rotationen in Laufbewegung umzuwandeln [139]. |
| 1865 | Dampfbetriebener Steam Man: <i>Georges Moore</i> präsentiert in ganz Europa den auf zwei Beinen laufenden <i>Steam Man</i> [183]. |
| 1872 | Bewegungsstudien mittels Fotografie: <i>Eadweard Muybridge</i> erstellt mit seinen Aufnahmen von laufenden Tieren und Menschen die Basis für viele Entwicklungen [152]. |
| 1893 | Mechanisches Pferd: <i>L.A. Rygg</i> entwickelt in den USA ein mechanisches Pferd und meldet das Lokomotionskonzept als Patent an [185]. |
| 1913 | Schreitwagen Patent: <i>Bechtolsheim</i> entwickelt ein fortschrittliches Konzept eines laufenden Schreitwagens und meldet diesen zum Patent an [205]. |

mit Muskelkraft gesteuert. Im gleichen Zeitraum entwickelten *McGhee* und *Frank* den ersten Laufrobo-

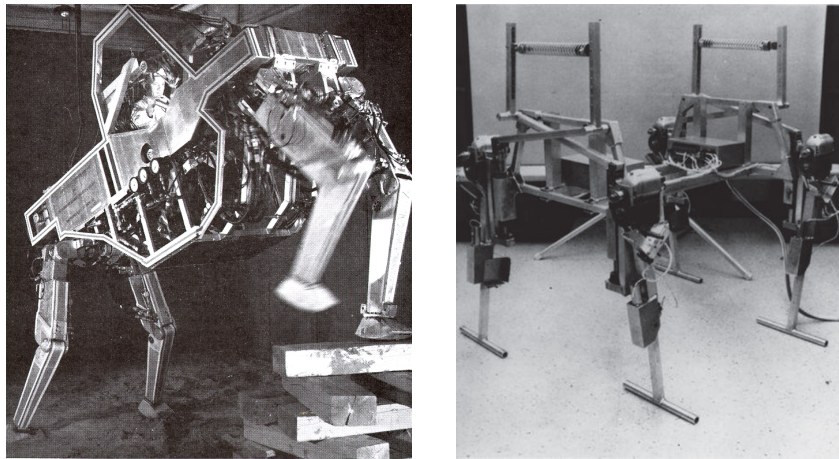


Bild A.4.: (links) *GE Walking Truck* von *Mosher* aus dem Jahr 1968. Quelle [175], (rechts) *Phoney Pony* von *McGhee* und *Frank* aus dem Jahr 1966. Quelle [157]

ter, der von einer einfachen digitalen Schaltung gesteuert wurde [144]. Die aufwändige Koordination und Bewegung der Beine musste somit nicht mehr von einem geschulten Bediener übernommen werden. Im Gegensatz zum *Walking Truck* wurden alle Gelenke mit elektrischen Motoren angetrieben. Dieser vierbeinige Laufroboter, *Phoney Pony*, verfügte über zwei Gelenke pro Bein, konnte jedoch noch keine Kurven laufen. Im Jahr 1976 wurde in Japan der vierbeinige Laufroboter *KUMO-I* entwickelt [95]. *Shigeo Hirose* konzentrierte sich bei diesem Laufroboter mit nur zwei Gelenken pro Bein vor allem auf den Leichtbau. Trotz der beachtlichen Beinlänge von 1,5 m erreichte *KUMO-I* ein Gewicht von nur 14 kg. Allerdings war die Antriebsleistung noch zu schwach, so dass Hirose bald weitere, stärkere Roboter entwickelte (siehe *TITAN* Roboterfamilie in Abschnitt A.2). Auch *McGhee* entwickelte nach den ersten Erfolgen mit dem *Phoney Pony* weitere Laufroboter an der Ohio State University, USA [146]. Der *OSU Hexapod* aus dem Jahr 1977 verfügte über sechs Beine mit jeweils drei Gelenken pro Bein. Im Fokus der Arbeiten stand die Regelung der komplexen Kinematik mit insgesamt 18 aktiven Freiheitsgraden. Der Roboter wurde später sogar mit Kraft- und Abstandssensoren sowie einer Kamera ausgestattet. Nicht nur in den USA, auch in

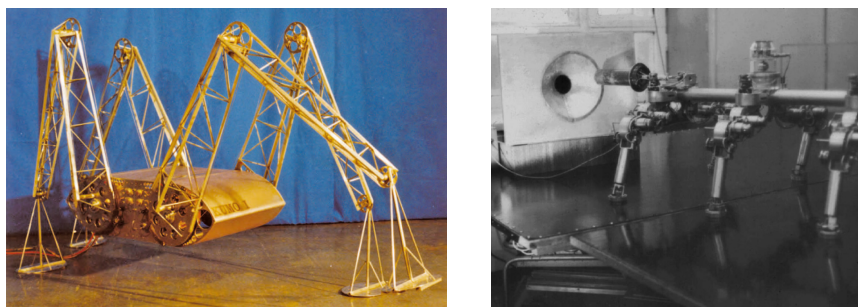


Bild A.5.: (links) *KUMO-I*: Japanischer Leichtbau-Laufroboter aus dem Jahr 1976. Quelle [95], (rechts) Bei *Masha* handelt es sich um einen der ersten Laufroboter, der von einem Vorgänger des Computers gesteuert wurde. Quelle [146]

Russland bzw. der damaligen Sowjetunion wurden computergesteuerte, laufende Roboter entwickelt. *Masha*, ein sechsbeiniger Laufroboter, wurde von *Gurfinkel* aufgebaut und diente später als Vorbild für weitere Laufroboter wie die sechsbeinige *Katharina* aus Magdeburg [90],[194]. Der Roboter wurde aus einer Kom-

bination von analogen und digitalen Schaltungen gesteuert - also den Vorgängern von heutigen Computern (siehe Abbildung . Die bisher vorgestellten, modernen Laufroboter wurden extern mit Energie versorgt und gelten streng genommen somit nicht als energetisch autark. 1983 entwickelte *Ivan Sutherland* den ersten energetisch autarken Laufroboter. Die *Six-Legged Walking Machine* wurde von einem Verbrennungsmotor angetrieben, der neben der Hydraulik auch einen Generator antrieb um die Onboard-Mikrocontroller sowie weitere Elektronik zu versorgen [209]. Dieser sechsbeinige Laufroboter war so groß und stark, dass er problemlos einen Menschen tragen konnte (siehe links in Abbildung A.6).

An der Ohio State University entstand 1985 das berühmte *Adaptive Suspension Vehicle (ASV)* [223][205]. *Waldron und McGhee* setzten mit diesem großen, hydraulischen Sechsbener neue Maßstäbe, was die Robustheit und Geländegängigkeit angeht. Das *Adaptive Suspension Vehicle* wurde von einem menschlichen Bediener gesteuert, der vorne in dem mehr als 5 m langen und 2.700 kg schweren Laufroboter seinen Platz hatte. Jedes Bein wurde von einem eigenen Computer gesteuert und so konnte das ASV Steigungen von bis zu 60° hochlaufen sowie Stufen von bis zu 1,65 m überwinden. Das ASV erreichte außerdem eine beachtliche Geschwindigkeit von bis zu 2,3m/s, konnte 250 kg tragen und zeigte damit, dass Laufroboter auch für Transportaufgaben geeignet sind [157]. Nachdem das ASV bewiesen hatte, dass Laufroboter in realen An-

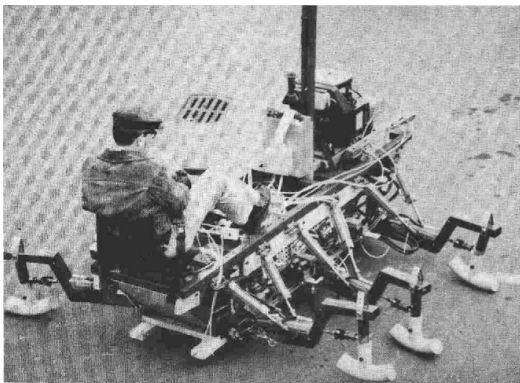


Bild A.6.: (links) *Six-Legged Walking Machine* von *Sutherland* aus dem Jahr 1983. Quelle [209], (rechts) *Adaptive Suspension Vehicle*: großer, hydraulischer Laufroboter mit guter Geländegängigkeit. Quelle [173]

wendungen einsetzbar sind, wurden viele anwendungsorientierte Laufroboter entwickelt. So entstand 1987 z.B. am Robotics Laboratory at the Ministry of Transport in Japan der sechsbeinige Laufroboter *Aquarobot* zur Erforschung der Tiefsee [2]. Wenig später im Jahr 1993 wurde *DANTE II* erfolgreich eingesetzt um in einen Vulkan hinabzusteigen und wissenschaftliche Daten zu sammeln [16] [157]. Im Jahr zuvor war noch der erste Roboter *DANTE*, nachdem das Halteseil gerissen ist, in den Vulkan gestürzt. *DANTE II* war jedoch sehr erfolgreich und lief mit seinen acht Beinen den Kraterrand eines Vulkans in Alaska hinab. Der Roboter wurde elektrisch angetrieben und über das Sicherungsseil mit Energie versorgt. Der Erfolg dieser Mission zeigte, dass der Einsatz von Laufrobotern auch in extremen Umweltbedingungen möglich ist und diese dort ihre Vorteile gegenüber radgetriebenen Fahrzeugen ausspielen können. In den Jahren 1989/90 entwickelte *Rodney Brooks* am MIT, USA verschiedene mehrbeinige Laufroboter zur Erkundung von fremden Planeten. Die beiden bekanntesten dieser Roboter waren *Genghis* (siehe rechts in Abbildung A.7) und *Attila*, die durch ihre verhaltensbasierte Software sehr früh bereits einen hohen Grad an Autonomie erreichten [12][11]. Die Roboter konnten Hindernisse selbstständig überwinden und passten sich dank ihrer Software reaktiv auch schwierigem Gelände an. Diese Roboter waren vor allem eine Evaluationsplattform für die von *Brooks* entwickelte, verhaltensbasierte *Subsumption* Architektur [40]. Im gleichen Jahr wurde in Karlsruhe am FZI



Bild A.7.: (links): Der achtbeinige Laufroboter *DANTE II* lief im Jahr 1994 erfolgreich in einen Vulkankrater hinab, Quelle [157], (rechts) Der sechsbeinige *Genghis* wurde vor allem eingesetzt um verhaltensbasierte Software zu evaluieren, Quelle [119]

Forschungszentrum Informatik der erste Laufroboter der *LAURON* Reihe (LAUfROboter Neuronal gesteuert) vorgestellt [Roennau et al., 2010b]. Diese erste *LAURON* Generation orientierte sich, wie alle späteren Generationen auch, an der indischen Stabheuschrecke (*Carausius morosus*) und bestand hauptsächlich aus Kohlenstoff-Elementen (siehe Abbildung A.8). Weitere Details zu den beiden Laufrobotern *LAURON IVc* und *LAURON V* finden sich am Ende des Abschnitts A.2

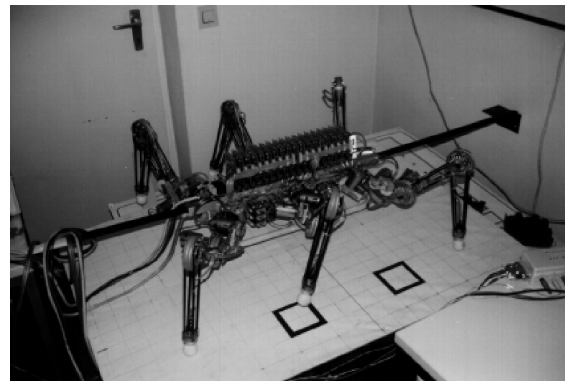
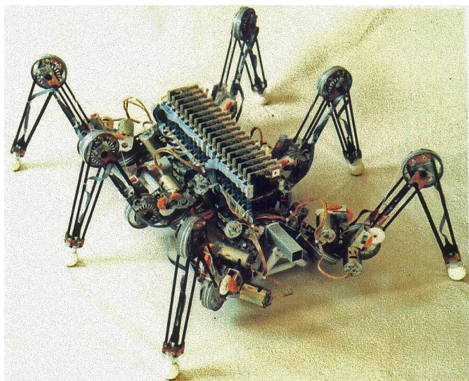


Bild A.8.: Erste Generation des Laufroboters *LAURON* des FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, aus dem Jahr 1994.

Tabelle A.2.: Zeitstrahl: Historische Entwicklung mehrbeiniger Laufroboter ab 1950

| | |
|------|--|
| 1966 | <p>Phoney Poney: <i>McGhee und Frank</i> entwickeln in den USA den ersten vierbeinigen Laufroboter, der von einem Computer gesteuert wurde [144].</p> |
| 1968 | <p>Walking Truck by GE: <i>Mosher</i> entwickelte einen vierbeinigen, laufenden Lastwagen, der jedoch noch komplett vom Menschen gesteuert wurde [151].</p> |
| 1976 | <p>KUMO-I: <i>Hirose</i> entwickelte in Japan den sehr leichten, vierbeinigen Laufroboter KUMO-I [95].</p> |
| 1977 | <p>OSU Hexapod: Nach dem <i>Phony Pony</i> entwickelte <i>McGhee</i> einen, neuen sechsbeinigen Laufroboter [146].</p> |
| 1977 | <p>Masha: In Russland bzw. der damaligen Sowjetunion entwickelte <i>Gurfinkel</i> ebenfalls einen computergesteuerten, sechsbeinigen Laufroboter [90].</p> |
| 1983 | <p>Sutherland Six-legged Walking Machine : <i>Sutherland</i> entwickelte einen großen, hydraulischen sechsbeinigen Laufroboter mit eigenem Onboard-Verbrennungsmotor [209].</p> |
| 1985 | <p>Adaptive Suspension Vehicle (ASV): Das sechsbeinige, hydraulische <i>Adaptive Suspension Vehicle</i> sollte für Transportaufgaben in schwierigem Gelände eingesetzt werden [223].</p> |
| 1987 | <p>Aquarobot: Das Robotics Laboratory at the Ministry of Transport in Japan entwickelte einen sechsbeinigen Laufroboter für die Tiefsee [2].</p> |
| 1990 | <p>Genghis und Attila: <i>Angle</i> entwickelte mit <i>Brooks</i> die Roboter <i>Genghis</i> und <i>Attila</i> [12][11] zur Evaluation der <i>Subsumption</i> Software Architektur [40].</p> |
| 1994 | <p>DANTE II: Der mehrbeinige Laufroboter <i>DANTE II</i> wurde erfolgreich zur Erkundungen von Vulkanen eingesetzt [157].</p> |
| 1994 | <p>LAURON: <i>Berns</i> entwickelte die erste <i>LAURON</i> Generation mit dem Fokus auf neuronale Lernverfahren [25][Roennau et al., 2010b].</p> |
| 1994 | <p>Katharina: Der symmetrische, sechsbeinige Laufroboter <i>Katharina</i> konzentrierte sich auf kraftbasierte Lokomotionskonzepte [191].</p> |

A.2. Ausgewählte, moderne Laufroboter

Da sich diese Arbeit intensiv mit Metriken und Optimierungsverfahren für mehrbeinige Laufroboter befasst, ist es wichtig einen Überblick über die Vielfältigkeit moderner Laufroboterentwicklungen zu bekommen. Hierzu werden verschiedene vier- und sechsbeinige Laufroboter in dem folgenden Abschnitt jeweils kurz vorgestellt.

SpaceClimber



Bild A.9.: (links) Der sechsbeinige Laufroboter *SpaceClimber* wurde speziell für planetare Explorationsmissionen entwickelt. Quelle [18]; (rechts) *CREX* ist die Weiterentwicklung des *SpaceClimber*, der in einem Roboterteam für Weltraummissionen eingesetzt werden soll. Quelle [180]

Der *SpaceClimber* ist ein sechsbeiniger Roboter, der für Explorationsmissionen auf dem Mond oder fremden Planeten entwickelt wurde (siehe links in Abbildung A.9). *Bartsch et al.* haben zunächst einige missionspezifische Anforderungen definiert, die dann durch umgebungsspezifische Anforderungen ergänzt wurden [18][19]. Im gesamten Entwicklungsprozess wurde darauf geachtet, dass nach Möglichkeit welt-raumtaugliche Komponenten eingesetzt werden und damit eine spätere Weltraum-Qualifikation schnell umsetzbar ist. Bei dem Design der Kinematik wurde auch auf Erfahrungen vorheriger Laufroboter, wie dem achtbeinigen *SCORPION*, zurückgegriffen [128]. Nach der sechsbeinigen, insektenartigen Auslegung der Kinematik wurde mit maschinellen Lernverfahren die exakte Anordnung der Gelenke und Längen der Segmente optimiert. *SpaceClimber* wurde entwickelt um auch in steile Krater hinein klettern zu können und dort wissenschaftliche Proben zu sammeln. Die vier Gelenke pro Bein bieten die hierfür benötigte kinematische Flexibilität. Außerdem wertet der Roboter zahlreiche Sensoren (z.B. Druck, Temperatur, Kräfte) gleichzeitig aus um einen sicheren Bodenkontakt herstellen zu können. Zudem verfügt *SpaceClimber* über verschiedene Fußdesigns, die je nach Aufgabe ausgewählt werden können. Bei der Konstruktion wurde darauf geachtet, dass das System gegenüber äußeren Umwelteinflüssen möglichst gut geschützt ist. Softwareseitig erzeugen sogenannte Pattern Generators (PG) die Laufmuster mit den Swing-Stemm-Bewegungen der Beine, eine Haltungskontroll-Einheit stabilisiert den Roboter und Reflexe reagieren auf Kollisionen mit der Umgebung. Das System besitzt Kameras und Laserscanner um die Umgebung zu kartographieren und Zielobjekte zu finden. *CREX* ist die Weiterentwicklung des *SpaceClimber*. Mechatronisch ist *CREX* weiterhin dem *SpaceClimber* sehr ähnlich. Dieses System soll in einem Team mit dem radgetriebenen Rover (*Sherpa*) eingesetzt werden um längere Explorationsmissionen durchführen zu können [180].

AMOS-WD06

Steingrube et al. konzentrieren sich in ihrer Forschung mit dem sechsbeinigen Laufroboter *AMOS-WD06* (siehe links in Abb. A.10) auf neuronale Netze zur Steuerung von komplexem Roboterverhalten. Dabei handelt es sich um ein schwieriges kombinatorisches Problem, da viele Sensorsignale in Echtzeit genutzt werden müssen um viele Aktoren gleichzeitig richtig anzusteuern. Diese Koordination muss nicht nur schnell, sondern muss auch adaptiv sein. Die Autoren nutzen hierfür *Chaos Control*, ein von ihnen entwickeltes Verfahren um komplexe Verhalten zu erzeugen. In der Arbeit von *Steingrube et al.* [208] wird gezeigt wie 11 unterschiedliche Verhaltensmuster für den Laufroboter *AMOS-WD06* erzeugt werden können. Dabei orientierten sie sich stets an biologischen Vorbildern wie der Stabheuschrecke, die ca. 10 bis 20 Basis-Verhaltensmuster zeigt. Im Kern der Arbeit wird das komplexe Verhalten durch einen sehr kleinen, neuronalen Mustergenerator (*CPG: Central Pattern Generator*) mit chaotischer Dynamik erzeugt. So kann der Roboter z.B. mit dem Sensorfeedback selbstständig Laufmuster auswählen. Weitere neuronale Netze steuern die Laufrichtung des Roboters. Umfangreiche Experimente zeigen, dass *AMOS* in der Lage ist autonom komplexe Hindernisse wie Barrieren, Steigungen, Löcher oder auch schwieriges Gelände zu überwinden.

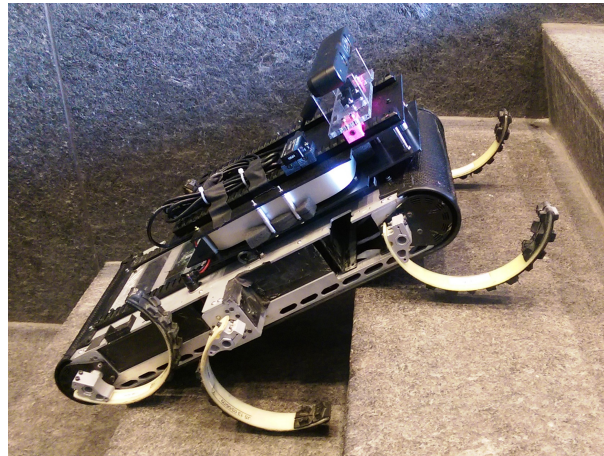
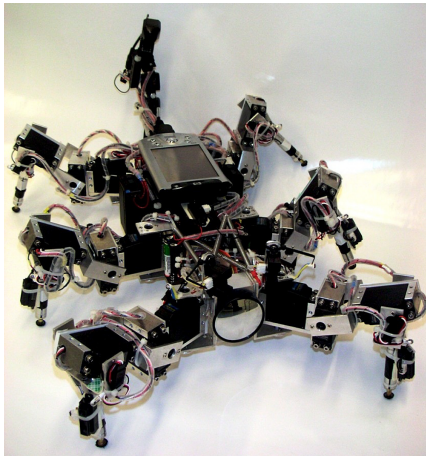


Bild A.10.: (links) Sechsbeiniger Laufroboter *AMOS-WD06* wird mittels *Chaos Control* gesteuert. Quelle [142]; (rechts) *RHex* ist durch die spezielle Kinematik extrem geländegängig und robust. Quelle [225]

RHex

Der sechsbeinige Laufroboter *RHex* ist aufgrund der sehr einfachen, aber effektiven Kinematik ein Sonderfall unter den mehrbeinigen Laufrobotern. In der Arbeit von *Saranli et al.* wird dessen initiales Design, Regelung, überlegende Laufeigenschaften und hoher Grad an Autonomie vorgestellt [187]. Der Roboter besteht aus einem starren Zentralkörper und sechs nachgiebigen Beinen, die jeweils von nur einem Motor angetrieben werden. *RHex* ist empirisch stabil und wird über eine einfache zeitbasierte Steuerung der Beine angetrieben. Auch ohne jegliche exterozeptive Sensoren kann der Roboter schwierige Hindernisse überwinden und erreicht sehr hohe Laufgeschwindigkeiten. In dieser frühen Version war *RHex* bereits in der Lage bis zu 15min völlig autonom mit nur zwei 12V Bleibatterien (2.2 Ah) zu laufen. Das Antriebskonzept mit den rotierenden Beinen erinnert eher an ein Speichenrad ohne Profil als an laufende Beine aus der Natur. Im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Rädern kann *RHex* die Bodenkontaktkraft jedoch exakt steuern. Das alternierende Tripod Laufmuster ist so synchronisiert, dass stets 3 Beine auf dem Boden sind. Die Autoren konnten

in einer selbst entwickelten Dynamik-Simulation zeigen, dass das außergewöhnliche Design stabil ist und auch das Laufen von Kurven realisiert werden kann. Auch konnte in der Simulation evaluiert werden, wie die verschiedenen Reglerparameter verändert werden müssen um verschiedenen Laufverhalten zu erzeugen. Der Roboter setzte bereits in dieser ersten Version Maßstäbe was die Laufgeschwindigkeit, Energieeffizienz aber auch Robustheit angeht. Aktuellere Arbeiten zeigen wie weit sich das System bis heute weiterentwickelt hat (siehe Abb. A.10 rechts). Mittlerweile kann *RHex* sich sogar auf weichem Untergrund am steilen Hang gut fortbewegen [179]. *RHex* setzt immer noch Maßstäbe was die Geländegängigkeit und Robustheit angeht.

SILO6

Bei der Entwicklung des Laufroboters *SILO6* sollten die Beine am Roboter so angeordnet werden, dass sich die Belastungen gleichmäßig verteilen. Hierfür haben *de Santos et al.* nichtlineare Optimierungsverfahren eingesetzt, die die Laufroboterbeine entsprechend am Zentralkörper anordnen [59]. Ziel war es vor allem die mittleren Beine, die ansonsten deutlich stärker belastet sind, so zu positionieren, dass sie genauso stark belastet werden wie die übrigen Beine. Neben der mechanischen Belastung wird so gleichzeitig die Energieeffizienz verbessert. Bei *SILO6* sind die vorderen, mittleren und hinteren Beine wie bei nahezu allen Laufrobotern bzgl. der Kinematik und der Mechanik identisch aufgebaut. Das vereinfacht die Entwicklung, macht die Wartung schneller und spart Kosten. In der Natur sind die Beine jedoch spezialisiert und sehr unterschiedlich. Die Arbeit von *de Santos et al.* konzentriert sich deshalb auf die verbesserte Anbringung der gleichartigen Beine an einem Laufroboter-Zentralkörper. Die Herleitung der Fußpunktkräfte für das Tripod Laufmuster zeigt, dass die mittleren Beine um ca. 29,2% mehr belastet sind als die vorderen und hinteren Beine. Der entwickelte Gauß-Newton-basierte-Optimierer verschiebt die mittleren Beinansatzpunkte soweit nach außen bis die Belastungen gleichförmig sind. Dies erhöht durch die vergrößerte Aufstandsfläche außerdem die Stabilität des Roboters. *SILO6* wurde als statisch stabil laufender Roboter mit minimalen Bodenkontakt für die Suche nach gefährlichen Landminen entwickelt.

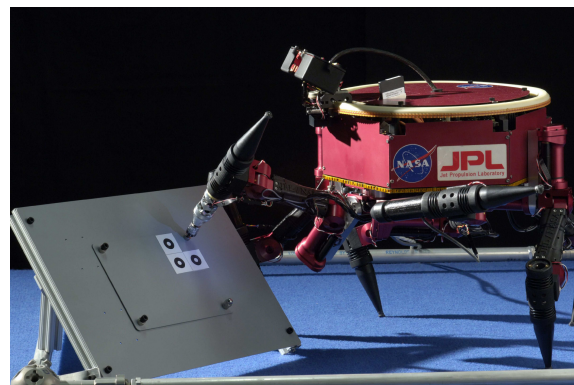
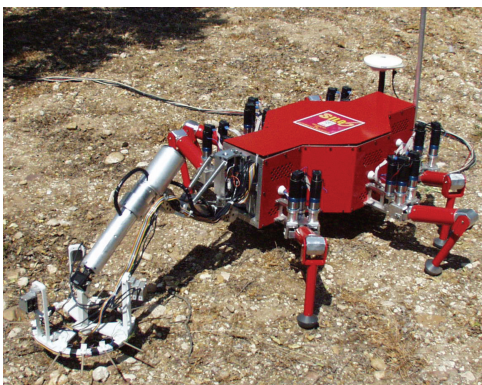


Bild A.11.: (links) Die Kinematik von *SILO6* wurde optimiert um eine gleichförmige Belastung der Beine sicherzustellen. Quelle [60]; (rechts) Die *LEMURII* Robotersysteme sind Lauf- und Kletterroboter und wurden für die planetare Erforschung von Kraterwänden entwickelt. Quelle [153]

JPL LEMURII

Das NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) hat verschiedene, mehrbeinige Laufroboter für Service- oder planetare Explorationsmissionen entwickelt. Bei dem Design der *LEMURII* Reihe wurden vier- und sechs-

beinige Laufroboter konzipiert und aufgebaut, die es ermöglichen sollen die gesamte Oberfläche eines Planeten zu erkunden. Im Gegensatz zu Rovern oder anderen Laufrobotern sollte mit diesen Systemen nicht nur flaches Gebiet erkundet werden können. *Kennedy et al.* stellen in ihrer Arbeit die Entwicklung sowie alle technischen Details des *LEMURIIb* Roboters vor [121]. *LEMURIIb* verfügt im Gegensatz zu *LEMURIIa* nur über vier Beine und weniger Freiheitsgraden pro Bein. Das reduziert vor allem das Gewicht, was zusammen mit vielen weiteren Verbesserungen das Klettern an steilen Hängen vereinfacht. Ein spezieller Ultraschall-Bohrer erlaubt es *LEMURIIb* Proben zu nehmen und gleichzeitig sicheren Halt im Gestein zu finden. Der entwickelte Bewegungsplaner berücksichtigt die zulässigen Belastungen pro Bein und sucht für den Roboter neue sichere Haltepositionen. Hierfür benötigt der Planer allerdings die Oberflächennormalen und Reibungskoeffizienten der möglichen Haltepunkte. Der Roboter tastet mit speziellen Sensoren die Oberfläche ab, während die verbleibenden drei Beine den Roboter mittels Kraftregelung sicher am Hang halten. Im Gegensatz zu vielen anderen Laufrobotern kann das System auch Hänge mit einer Steigung größer als 45° überwinden.

Katharina

Der sechsbeinige Laufroboter *Katharina* mit der markanten hexagonalen Beinanordnung wurde am Fraunhofer IFF in Magdeburg entwickelt [194]. Der Roboter basiert auf Erfahrungen bei der Entwicklung des *Masha* Roboters an der Russian Academy of Sciences, Moskau. *Schmucker et al.* entwickelten eine komplexe Kraftregelung, die *Katharina* zum einen ermöglichte sowohl in starren, unwegsamen wie in weichem Gelände sicher zu laufen [190]. Zum anderen sollte diese Kraftregelung auch für Montage- und Bohraufgaben mit dem Roboter verwendet werden. Der gesamte Roboter sollte in solchen Anwendungen dank der nachgiebigen Kraftregelung auch feinfühlig, schwierige Aufgaben übernehmen. Die Kraftregelung nutze die 3D-Kraftsensoren in den Beinen. Außerdem verfügte *Katharina* über nachgiebige, passive Füße, die das System dabei unterstützen sich an den Untergrund anzupassen. Die Kraftregelung wurde in zwei Komponenten unterteilt. Die erste Komponente regelte die Kräfte an der Fußspitze und sorgte für das gewünschte Impedanzverhalten der Beine. Die zweite Komponente betrachtete die Gesamtkraftregelung des System, die auch für die Lokomotion notwendig war. Je nach Untergrund musste die Kraftregelung dafür sorgen, dass die Kräfte auf festem Untergrund innerhalb der Reibungskegel der Füße blieben oder auf weichem Untergrund die Füße nicht im Boden versanken.

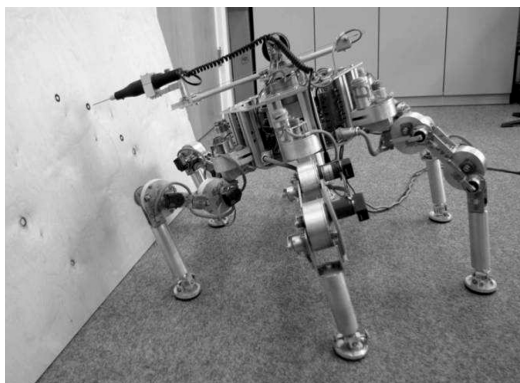


Bild A.12.: (links) Sechsbeiniger Laufroboter *Katharina* kann dank der kraftbasierten Regelung als mobile Werkzeugplattform eingesetzt werden. Quelle [190]; (rechts) Der Laufroboter *BigDog* war der erste mehrbeinige Laufroboter von Boston Dynamics und beeindruckte bereits zu Beginn mit seiner stabilen, robusten Lokomotion. Quelle [36]

Bosten Dynamics Spot

Seit vielen Jahren beeindruckt Boston Dynamics mit immer neuen Videos von mehrbeinigen Laufrobotern auf der Video-Plattform YouTube. Der erste vierbeinige Roboter *BigDog* überzeugte bereits mit hervorragenden Laufeigenschaften (siehe rechts in Abbildung A.12). Hinsichtlich Geländegängigkeit und Geschwindigkeit sind die verschiedenen, dynamisch laufenden Robotersysteme von Bosten Dynamics unerreicht. Da es sich jedoch um privatwirtschaftliche Forschung handelt, gibt es keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen oder technische Details zu den Systemen. Es ist nur bekannt, dass die Entwicklungen auf den frühen, wissenschaftlichen Arbeiten vom Bosten Dynamics Gründer *Marc Raibert* [175] basieren. In den vergangenen Jahren hat Bosten Dynamics große, leistungsstarke Systeme wie *LS3 - Legged Squad Support Systems* - entwickelt, die für die Unterstützung von militärischen Operationen in schwierigem Gelände eingesetzt werden sollen [37]. Aber auch kleinere Systeme wie *Spot* und *SpotMini* zeigen beeindruckende Fähigkeiten [1][38]. Diese Systeme besitzen nicht nur hervorragende, robuste Laufeigenschaften, sondern können auch mit einem zusätzlichen Manipulator schwierige Aufgaben lösen. So kann *SpotMini* eine verschlossene Tür, auch bei massiven Störungen durch einen Menschen noch sicher öffnen. Ebenso kann der Roboter Gegenstände in den Geschirrspüler ablegen oder Sachen wegräumen. Da jedoch keine technischen Details bekannt sind, ist nicht klar, ob die gezeigten Fähigkeiten vollständig autonom, semi-autonom, fest programmiert oder teleoperiert ausgeführt wurden. Selbst wenn alle Bewegungen durch einen menschlichen Bediener via Teleoperation gesteuert würden, wären die Robotersysteme mechatronisch immer noch sehr beeindruckend.

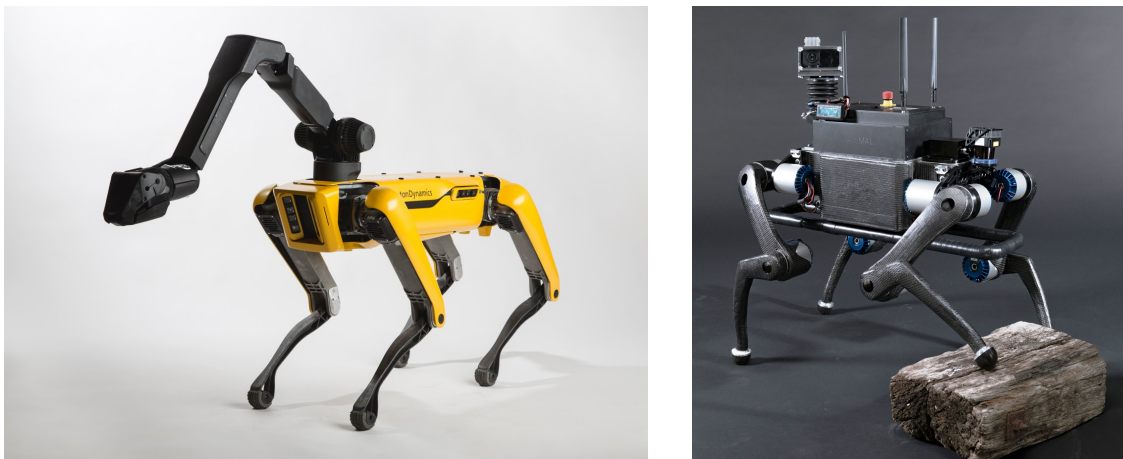


Bild A.13.: (links) Boston Dynamics setzt neue Maßstäbe mit ihren mehrbeinigen Laufrobotern. Das Bild zeigt den neusten, voll elektrischen Laufroboter *SpotMini*. Quelle [39]; (rechts) Der agile, robuste vierbeinige Laufroboter *ANYmal* nutzt modulare Serial-Elastic-Actuators um dynamisches Laufen in realen Anwendungen zu ermöglichen. Quelle [104]

ANYmal

Der vierbeinige Laufroboter *ANYmal* ist eines der wenigen Robotersysteme, das sich von der Laufgeschwindigkeit, Robustheit und Dynamik mit den Fähigkeiten der Roboter von Boston Dynamics mithalten kann. *ANYmal* ist die konsequente Weiterentwicklung des *StarlETH* Roboters [102]. Im Gegensatz zu diesem wurde bei *ANYmal* die Reglerelektronik direkt in kompakte Gelenkmodule integriert. Diese sogenannten *ANYdrives* machen den Laufroboter robuster, wartungsärmer und somit für reale Anwendungen einsetz-

barer. Die *ANYdrives* zählen zu den sogenannten *Serial Elastic Actuators*. Das bedeutet, dass zwischen dem Harmonic Drive Getriebe und dem Beinsegment eine elastische Feder eingebaut wurde, die Stöße und Schläge abfedert. Zusammen mit den seit vielen Jahren kontinuierlich weiterentwickelten Regelungskonzepten (kaskadierter Positions-Drehmoment Regler mit Reibungskompensation) können die *ANYdrives* extrem schnell auf abrupte Kollisionen reagieren. *Hutter et al.* zeigen, dass auch Kollisionen bei sehr hohen Gelenkwinkelgeschwindigkeit nur sehr kleine Drehmomente ($< 7 \text{ Nm}$) am Getriebe erzeugen [104]. Der Roboter wiegt ca. 30 kg und besitzt drei Gelenke pro Bein. Durch das intelligente Design der Kinematik können alle Gelenke frei rotiert werden, so dass die Beine einen sehr großen Arbeitsraum abdecken. Mit den großen Onboard-Batterien, drei NUC PCs sowie zahlreichen Sensoren kann *ANYmal* mehr als 2 Stunden teleoperiert oder auch autonom operieren. Mit einer maximalen Laufgeschwindigkeit von 0,8 m/s, der guten Geländegängigkeit und dem kompakten, abgeschlossenen Design kann *ANYmal* für zahlreiche Anwendungen eingesetzt werden. *ANYmal* wurde im Rahmen der *TOTAL ARGOS oil and gas site inspection challenge*¹ und in der *NCCR Search and Rescue grand challenge*² unter realistischen Einsatzbedingungen intensiv evaluiert.

Snake Monster

Das sogenannte *Snake Monster* wurde nicht als Laufroboter entwickelt, sondern basiert auf modularen, rekonfigurierbaren Elementen, die ursprünglich für einen hochflexiblen Schlangenroboter entwickelt wurden [115]. Die robusten Module können in verschiedenen Konfigurationen zu sehr unterschiedlichen Kinematiken zusammengefügt werden. Eine Besonderheit ist, dass jedes Modul über einen hybriden Kraft-Positionsregler verfügt, mit dem auch kraft- bzw. momentenbasiertes Laufen realisiert werden kann. Ziel bei der Entwicklung des rekonfigurierbaren, modularen Baukastens war es, ein System für Ersthelfer bei Search-and-Rescue Missionen bereitstellen zu können. Die Anforderungen in solchen Szenarien sind sehr schwierig und zugleich extrem unterschiedlich. Durch das rekonfigurierbare Design soll der Roboter in kürzester Zeit an die Einsatzbedingungen angepasst werden können. Die Robustheit der Module hinsichtlich dem mechanisch Aufbau, aber auch der Steuerungssoftware standen im Fokus der Arbeiten. Die Module basieren wie bei *ANYmal* auf sogenannten *Serial Elastic Actuators*, also einer mechanischen Impedanz zwischen dem Motor und der Getriebestufe. Beim *Snake Monster* werden hierfür spezielle Gummi-Federn eingesetzt. Über Parameter lässt sich einstellen, ob ein Gelenk eher positions- oder kraftgeregelt sein soll. Als dritte Option können direkt Gelenkwinkelgeschwindigkeiten geregelt werden. *Kalouche et al.* beschreiben einen sechsbeinigen Laufroboter mit je 3 Gelenken pro Bein sowie einen vierbeinigen Laufroboter mit je vier Gelenken pro Bein [115]. Die Robotersysteme werden semi-autonom über ein Gamepad kommandiert. Der Vierbeiner verfügt über Rollen an den Füßen und kann sich wie ein 'Inlineskater' elegant fortbewegen. Die Daten sämtlicher Lagesensoren in den Modulen werden intelligent fusioniert und so die Lage des Gesamtroboters zuverlässig ermittelt. Verschiedene Experimente haben gezeigt, dass *Snake Monster* besser mit Hindernissen und Störungen zurechtkommt, wenn die Kraftregelung in den Gelenken dominiert. Insgesamt zeigt *Snake Monster* sehr gute Laufeigenschaften hinsichtlich Geschwindigkeit, Robustheit und auch Energieeffizienz. Zudem hat das hochmodulare Konzept Potential zukünftig in realen 'Search-and-Rescue' eingesetzt zu werden.

¹Details zur TOTAL ARGOS Robotik Wettbewerb: <http://www.argos-challenge.com>

²Details zum Schweizer Search and Rescue Wettbewerb: <http://www.nccr-robotics.ch/RescueRobots>



Bild A.14.: (links) Modularer, rekonfigurierbarer Laufroboter *Snake Monster*. Quelle [215]; (rechts) Der kleine *DLR-Krabber* wurde aus sechs Finger der DLR-Hand II aufgebaut. Quelle [86]

DLR-Krabbler

Der *DLR-Krabbler* ist ein kleinerer Laufroboter, der sechs Finger der DLR-Hand II als Beine nutzt. Dies bringt den großen Vorteil, dass jedes Bein über eine sehr gute, modellbasierte Impedanzregelung verfügt. Hierüber lässt sich die Nachgiebigkeit der Beine nahezu frei parametrisch einstellen. Im Gegensatz zu vielen anderen Laufrobotern basiert die Kraftregelung auf realen Drehmoment-Messungen in den Gelenken und wird nicht nur über den Motorstrom geschätzt. Der Vorteil die hochentwickelten Finger als Beine einsetzen zu können, kommt jedoch auch mit dem Nachteil, dass die Gelenke nur über einen kleinen Arbeitsraum verfügen. Jeder Finger besitzt drei aktive Gelenke. *Görner et al.* bestimmen mit Hilfe verschiedener Arbeitsraumanalysen die bestmögliche Konfiguration der Beine am Zentralkörper [86]. Diese Analysen zeigen, dass durch ein Neigen des Beinansatzpunktes um ca. 30° der Arbeitsraum um 60% vergrößert werden kann. Für das finale Design haben *Görner et al.* entschieden die Beine nur um ca. 15° zu neigen um die mögliche *Schritthöhe* und damit das Überwinden von Hindernissen nicht zu sehr einzuschränken. Aufgrund der Größe und der hohen Anforderungen an die Regelungselektronik, wird der Roboter über einen externen Steuerrechner betrieben. Trotz der kleinen Größe (Zentralkörper: 250 mm lang, 176 mm breit) erreicht der *DLR-Krabbler* eine Laufgeschwindigkeit von ca. 0,2 m/s und kann bis zu 3 kg zusätzliche Last tragen.

TITAN

Die *TITAN* Laufroboter können auf eine lange Historie zurückblicken. Seit vielen Jahren entwickelt *Shigeo Hirose* vierbeinige Laufroboter am Tokyo Institute of Technology in Japan. Einen Überblick über die verschiedenen *TITAN* Robotersysteme gibt die Arbeit [95]. Von der erfolgreichen achten Generation, dem *TITAN-VIII*, wurden insgesamt über 70 Roboter an Forschungseinrichtungen verkauft. Die aktuelle Generation ist der sehr leichte, vierbeinige *TITAN-XIII* [127]. Auch bei diesem Roboter wählten *Kitano et al.* eine insektenartige Kinematik, mit einem sehr breiten Stand. Dies ist ungewöhnlich für vierbeinige Laufroboter, da diese sich ansonsten eher an einer Säugetier-Kinematik mit kleinerer Aufstandsfläche orientieren. Ziel bei der Entwicklung der 13. Generation war es das Gewicht weiter zu reduzieren und so das Verhältnis Antriebsleistung-zu-Gewicht zu verbessern. Um das dynamische Laufen umsetzen zu können, wurde ein neues Laufmuster entwickelt. Der sogenannte 'LAT-Trab' basiert auf speziellen, optimierten Trajektorien ('longitudinal acceleration trajecotories' - LAT), welche die Stabilität des Roboters beim Laufen verbessern [127]. Beim Design wurde stark auf die Gewichtsreduktion geachtet und vor allem leichte Materialien und Seilzüge verwendet um die Trägheit der Beine auf ein Minimum zu reduzieren. Im Vergleich zur *TITAN-VIII* Generation ist dieser Roboter doppelt so schnell und erreicht eine Geschwindigkeit von 0,71

m/s. Die *TITAN* Laufroboter haben auch in anderen Bereichen wichtige wissenschaftliche Beiträge geliefert. So entwickelten *Ohtsuka et al.* einen intelligenten, adaptiven Fuß, der sich am Untergrund festhalten konnte und die Geländegängigkeit von *TITAN-VIII* deutlich verbesserte [159]. Eine weitere, bekannte Generation ist der hybride *TITAN-X* Roboter. Dieser verfügt über umklappbare, passive Rollen am Ende der Beine und bewegt sich wie ein 'Rollschuhfahrer' effizient und schnell auf flachem Gelände fort [98].

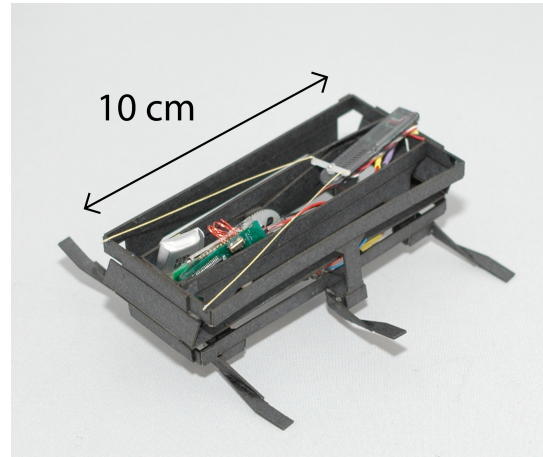


Bild A.15.: (links) *TITAN XIII* - Dynamisch laufender, vierbeiniger Roboter aus der *TITAN* Laufroboter-Familie. Quelle [126]; (rechts) Sehr schneller, leichter und kleiner Laufroboter *DASH*. Quelle [31]

DASH

Der sechsbeinige Roboter *DASH* ist von der Größe, aber auch von dem Lokomotionsapparat her, ein ungewöhnlicher Laufroboter. Der nur ca. 10 cm große Roboter wird von einem einzigen Elektromotor angetrieben und wiegt insgesamt nur ca. 16 g. Zudem kann dieser, durch eine kleine Batterie angetriebene Sechsheiner, bis zu 15 Körperlängen pro Sekunde schnell laufen und übertrifft damit hinsichtlich der relativen Geschwindigkeit alle klassischen Laufroboter. Das Design orientiert sich an der amerikanischen Kakerlake, die ebenfalls hohe Geschwindigkeiten erreichen kann [31]. Das Laufverhalten basiert auf einem einfachen, alternierenden Tripod Laufmuster und die Dynamik des Laufens nähert sich stark dem sogenannten SLIP Modell an (*Spring-Loaded Inverted Pendulum* - wird eigentlich vor allem zur Beschreibung von zweibeinigen Lokomotionsverhalten verwendet [33]). Das geringe Gewicht wird vor allem durch das *Smart Composite Manufacturing (SMC)* erreicht. Hierbei werden Komposit-Werkstoffe gefaltet und passend zurechtgeschnitten und so extrem leichte, robuste Konstruktionen hergestellt. Die intelligent, gefaltete Kinematik setzt die Rotationsbewegung eines kleinen DC Motors ohne Getriebe oder Kugellager in die Tripod-Laufbewegungen um. Ein kleiner Aktor aus einer Formgedächtnislegierung wird genutzt um den ganzen Körper zu verformen und so den Roboter nach links und rechts lenken zu können. Durch dieses extrem leichtgewichtige Design erreicht *DASH* die beeindruckenden 1,5 m/s für bis zu 40 min mit einer einzigen Batterieladung. Analysen des Laufverhaltens haben gezeigt, dass der Sechsheiner sogar echte Flugphasen erreicht und ähnliche Bodenkraftprofile aufweist wie eine laufende Kakerlake. Durch die Komposit-Bauweise und die elastischen Beine, weist der gesamte Roboter eine hohe Nachgiebigkeit auf. Er übersteht auch Stürze aus Höhen größer als 20 m ohne Schaden. *DASH* kann dank der Nachgiebigkeit Hindernisse überwinden, die höher als seine eigene Körperhöhe sind. Aufgrund der kleinen Größe ist es noch schwierig *DASH* mit Sensoren auszustat-

ten. Was die Lokomotionsleistung angeht zeigt *DASH* jedoch eine überlegene Leistung gegenüber größeren Laufrobotern.

Hexabot - ein OpenSource Laufroboter-Projekt

Es gibt weltweit zahlreiche sechsbeinige Laufroboter-Projekte. Diese Projekte konzentrieren sich meist auf einfache, sechsbeinige Kinematiken und setzen günstige Servomotoren als Antriebstechnik ein. Die große Vielzahl an Robotersystemen ist auch ein starker Indikator für das große Interesse an mehrbeinigen Laufrobotern [13][140][73]. So sind mittlerweile auch verschiedene kommerzielle Bausätze erhältlich, die beachtliche Laufleistungen erreichen. Durch die leichte Bauweise laufen diese Systeme mit relativ hohen Geschwindigkeiten und sind durch die insektenartige Kinematik stabil sowie robust. *Dupeyroux at al.* vergleichen ihren *Hexabot*, ein OpenSource Laufroboter-Projekt, mit dem kommerziellen *Phantom X* Bausatz von Interbotics Labs, USA [216]. Ziel der Forscher war es eine Plattform auszuwählen, die zur Evaluation eines von Ameisen inspirierten Navigationsverfahren geeignet ist. Der *Phantom X* Roboter kann bis zu 2 kg Last tragen und erreicht eine Geschwindigkeit von bis zu 0,8 m/s. Die *Hexabot* Plattform läuft hingegen mit einer Geschwindigkeit von bis zu 0,35 m/s und kann nur 450 g zusätzlich tragen. Größter kinematischer Unterschied zwischen den beiden Systemen ist die Anbringung der Beine am Zentralkörper. Die *Hexabot* Plattform hat im Gegensatz zu *Phantom X* die Beine ohne Vorzugslaufrichtung in einem Hexagon angeordnet. Beide Roboter wurden mit einem externen Tracking-System vermessen und so deren Stabilität hinsichtlich Roll-, Pitch- und Yaw-Schwingungen beim Laufen untersucht. Da das Schwingen bei der *Hexabot* Plattform etwas kleiner ausfällt und die Schwingungen Ähnlichkeiten zu denen bei Wüstenameise aufweisen, haben sich die Autoren entschieden diese Plattform für ihre weitere Forschung zu nutzen.

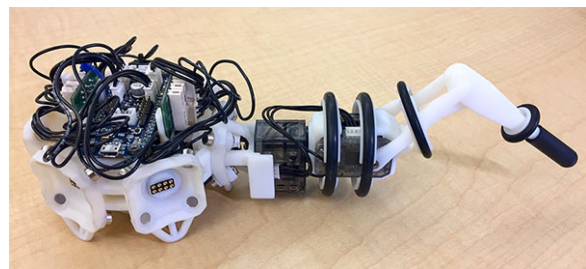
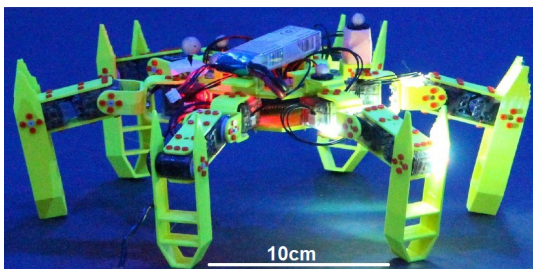


Bild A.16.: (links) 3D-gedruckter OpenSource Laufroboter *Hexabot*. Quelle [70]; (rechts) Online rekonfigurierbarer Laufroboter *Snapbot*. Quelle [123]

Snapbot

Zwar können Insekten, Säugetiere oder Reptilien nicht die Anzahl ihrer Beine verändern, jedoch passiert es, dass Eidechsen ihren Schwanz abwerfen um Fressfeinden zu entkommen oder Insekten einzelne Beine verlieren und anschließend weiterlaufen. Diese Flexibilität mit einer veränderten Kinematik laufen zu können, stand im Fokus der *Snapbot* Entwicklungen. Der *Snapbot* erkennt eigenständig die aktuelle Beinkonfiguration und passt die Fortbewegungsstrategie entsprechend an [123]. Die sechs Beine können über starke Magneten mit einer 0° oder 180° Orientierung mit dem Zentralkörper verbunden werden. Im hexagonförmigen Zentralkörper ist neben einem Mikrocontroller, der die Konfiguration erkennt und das Laufmuster anpasst, auch eine Lithium-Ion Batterie untergebracht. Durch modernen 3D-Druck sind alle Komponenten sehr leicht. Der Zentralkörper wiegt z.B. nur 187 g. Es gibt drei verschiedene Bein Designs: ein Roll-Pitch

Design, Yaw-Pitch Design und Roll-Yaw-Pitch Design. Die Beine verfügen über zwei bzw. drei Gelenke. Mit den sechs Beinansatzpunkten und drei verschiedenen Bein Designs ergeben sich 700 verschiedene, mögliche Konfigurationen. Jedes Bein verfügt über eine eindeutige Identifikationsnummer, so dass der Roboter sofort erkennen kann, welches Bein an welcher Stelle angebracht ist. *Snapbot* kann sich mit 1 bis 6 Beinen fortbewegen (siehe rechts in Abb. A.16). Mit einem Bein, kann er sich jedoch nur sehr langsam über den Boden ziehen. Zwei bis drei Beine nutzt *Snapbot* um über den Boden zu kriechen. Mit vier bis sechs Beinen kann der Roboter laufen. Beeindruckend ist, dass die Lokomotionsstrategie online verändert wird, wenn Beine entfernt oder hinzugefügt werden. Allerdings schränken die Autoren die Anzahl der unterstützten Konfigurationen ein, da die Laufstrategien für ausgewählte Konfigurationen von Hand programmiert wurden.

Pleurobot

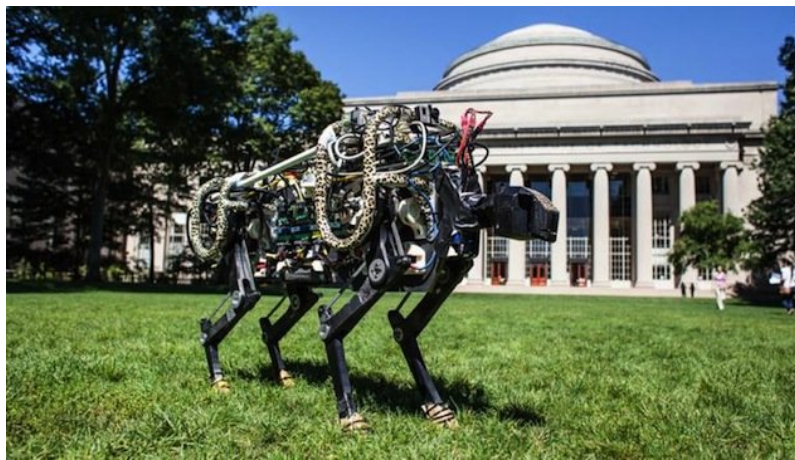


Bild A.17.: (links) Biologisch motivierte Laufroboter *Pleurobot*. Quelle [118]; (rechts) *MIT Cheetah 2* Laufroboter nach dem Vorbild eines Gepards. Quelle [71]

Laufroboter werden immer öfter als wissenschaftliche Werkzeug entwickelt um die Lokomotion von Insekten und Tieren besser verstehen zu können. Viele kinematische und dynamische Eigenschaften lassen sich am realen Tier nur schwer beobachten, untersuchen oder verändern. *Karakasiliotis et al.* stellen in ihrer Arbeit eine Entwicklungsmethode für Laufroboter vor, die auf detaillierten Skelett- und Gelenkrekonstruktionen aus CT-Bildern, genetisch optimierten Kinematiken und 3D-Druckverfahren beruht [118]. Der so entstandene *Pleurobot* (siehe links in Abb. A.17) wurde nach dem biologischen Vorbild des Salamanders entwickelt. Mit insgesamt 27 Freiheitsgraden ist das System in der Lage direkt vom Salamander aufgenommene Bewegungsprofile abzuspielen und so eine natürliche Lokomotion zu erzeugen. Selbst die gemessenen Bodenkontaktkräfte sind denen von realen Salamandern sehr ähnlich. Dabei war die exakte Platzierung der 27 Gelenke eine schwierige, aufwändige Aufgabe, bei der die Wissenschaftler CT-basierte Aufnahmen aus verschiedenen Blickrichtungen analysiert und annotiert haben. Anschließend wurde ein genetischer Algorithmus verwendet um das kinematische Modell des Roboters, also die Anzahl und Positionierung der Gelenke, anhand dieses virtuellen Skelettmodells zu optimieren. Im Gegensatz zum Vorgänger Roboter, *Salamandra Robotica II* [51], sollte *Pleurobot* komplexere Beine mit jeweils 3 Freiheitsgraden erhalten. Durch die Größe der eingesetzten Servomotoren musste die Größe des Roboters skaliert werden. *Pleurobot* ist ca. 8,6 Mal so groß wie ein durchschnittlicher Salamander. Bei der Auslegung der Dynamik wurde eine

dynamische Skalierung vorgenommen um die Vergleichbarkeit trotz der Größenunterschiede gewährleisten zu können. Ziel der Arbeiten ist es das Zusammenspiel zwischen Zentralen Mustergeneratoren (CPG), Sensorfeedback und komplexen, motorischen Verhalten besser zu verstehen.

MIT Cheetah 2

Der vierbeinige Laufroboter *MIT Cheetah 2* ist die Weiterentwicklung des vorher noch auf eine reine 2D-Bewegung reduzierten Roboters *MIT Cheetah* [201]. Auch dieser zweite Roboter folgt den vier entwickelten Designregeln zur Steigerung der Energieeffizienz (siehe auch Kapitel 3). Für die *MIT Cheetah* Roboter wurden spezielle Hochdichte-Torque-Motoren entwickelt, die eine geringe Wärmeverlustleistung haben und nur eine einstufige Getriebeuntersetzung brauchen um die benötigten Drehmomente zu erzeugen. Im Gegensatz zur ersten Generation besitzt *MIT Cheetah 2* drei Gelenke pro Bein und muss nicht mehr entlang der vertikalen Ebene stabilisiert werden [163]. Das Schulter- und Kniegelenk sind über eine Parallelogramm-Struktur miteinander gekoppelt. Ein drittes Gelenk in der Schulter sorgt für die seitliche Stabilisierung. Das Konzept der elastischen Wirbelsäule der ersten Generation wurde bei *MIT Cheetah 2* nicht übernommen. Im Fokus der Forschung liegt die schnelle, stabile Lokomotion in realen Outdoor-Umgebungen. *Park et al.* konnten zeigen, dass impulsbasierten Planungsverfahren in der Lage sind die Kraftregelung des Gesamtsystems stabil zu koordinieren. Der Ansatz ermöglicht es ohne Veränderung an der eigentlichen Kraftregelungen den vierbeinigen Laufroboter bei Geschwindigkeiten zwischen 0 m/s und 4,5 m/s auf ebenen Untergrund stabil laufen zu lassen. Erweiterungen dieses Konzeptes erlauben es *MIT Cheetah 2* sogar beim Laufen über Hindernisse mit einer Höhe von 40 cm zu springen [165]. Damit ist *MIT Cheetah 2* aktuell einer der leistungsfähigsten Laufroboter und kann mit den Systemen von Boston Dynamics verglichen werden.

RoboSimian

Der vierbeinige Laufroboter *RoboSimian* des NASA Jet Propulsion Laboratory ist durch zwei Ereignisse in der Robotik Community sehr bekannt geworden. Zum einen nahm der Roboter erfolgreich an der *DARPA Robotics Challenge (DRC)*³ teil und war dort der einzige vierbeinige Roboter im Einsatz [92]. Zum anderen wurde der Roboter durch einen gefährlichen Brand der Akkumulatoren nahezu vollständig zerstört [83]. *RoboSimian* läuft mit allen vier Beinen und kann ebenso mit diesen Beinen Objekte manipulieren. Jedes Bein verfügt über 7 Freiheitsgrade. Insgesamt ist *RoboSimian* mit 28 Gelenken, die für die Lokomotion verwendet werden, einer der komplexesten Laufroboter, die bisher erfolgreich eingesetzt wurden. Außerdem verfügt jedes Bein über einen eigenen Kraft-Momenten-Sensor sowie eine 3-Finger Hand, die entweder zum Laufen oder für Manipulationsaufgaben genutzt werden kann. Die sieben Beingelenke sind identisch aufgebaut, was die Integration und Wartung deutlich vereinfacht. Bei den Gelenken handelt es sich um klassische Antriebstechnik mit *Harmonic Drive Getrieben*. Zwei aktive Antriebsräder am Körper erlauben *RoboSimian* sich auch fahrend fortzubewegen. Insgesamt konnte *RoboSimian* bei der DRC hinsichtlich seiner Flexibilität und Geländegängigkeit, auch in Szenarien mit Umgebungen, die für den Menschen gemacht wurden, mit guten Leistungen überzeugen. Kernstück der Software ist ein komplexer Bewegungsplaner, der sowohl für das Laufen, aber auch für die Manipulationsaufgaben die richtigen Bewegungen ermittelt. Mehrere im Körper integrierte Stereo-Kameras sorgen für detaillierte 3D-Daten der Umgebung. Während der DRC wurden

³Details zur DRC: <https://www.darpa.mil/program/darpa-robotics-challenge>

die Ergebnisse des Bewegungsplaners jeweils noch von Experten geprüft und erst nach einer Freigabe von dem Roboter ausgeführt. Das kostete viel Zeit und machte *RoboSimian* langsam im Wettbewerb.

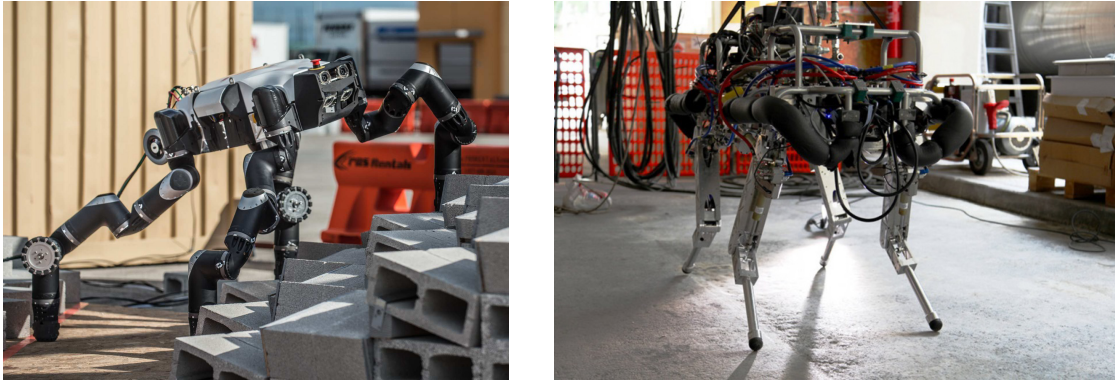


Bild A.18.: (links) Der *RoboSimian* des JPL ist mit 28 aktiven Freiheitsgraden einer der komplexesten eingesetzten Laufroboter überhaupt. Quelle [92]; (rechts) vierbeiniger, hydraulischer Laufroboter *HyQ* mit externem Kompressor. Quelle [199]

HyQ

Neben den Laufrobotern von Boston Dynamics ist der vierbeinige *HyQ* mit einer Schulterhöhe von 0,98 m einer der größten, dynamisch laufenden Robotersysteme. Im Gegensatz zu den meisten anderen mehrbeinigen Robotersystemen wird dieses System vor allem hydraulisch angetrieben. Mit drei Gelenken pro Bein und der Onboard-Hydraulikpumpe erreicht der Roboter ein Gewicht von mehr als 90 kg [200]. Als Hüftgelenk wird ein leistungsstarker elektrischer Motor eingesetzt. Dieser wurde direkt am Zentralkörper verbaut und erhöht so nicht die Masse bzw. Trägheit der Beine. Die beiden hydraulischen Bein-Gelenke tragen vor allem das Gewicht des Roboters und sorgen für den Vortrieb. Der Einsatz von hydraulischen Antrieben bringt viele Vorteile wie z.B. ein hervorragendes Leistungs-Gewicht-Verhältnis, Robustheit gegenüber Stößen und Schlägen, eine hohe Regelungs-Bandbreite, aber auch viele Herausforderungen. Das Laufen erfordert neben einem komplexen Regler viel Kenntnis über hydrodynamische Effekte und Erfahrung bei der Konstruktion von hydraulischen Systemen. *HyQ* erreicht beeindruckende Laufleistungen mit aktiven Flugphasen (alle 4 Beine gleichzeitig in der Luft) und kann dank der Onboard-Sensorik die Umgebung erfassen. Dies erlaubt es dem System seine Fußpunkte zu planen und die Geländegängigkeit bei langsamer Laufgeschwindigkeit weiter zu steigern [226]. In der Regel wird *HyQ* mit einer externen Hydraulik-Pumpe betrieben, da die Integration der Onboard-Pumpe einige Schwierigkeiten verursacht. Die neue Version *HyQ2Max* wird viele ultraleichte 3D-Druckteile verwenden und gleichzeitig in den Beinen höhere Drehmomente mit einem größeren Winkelbereich erreichen [198]. Neben der verbesserten Robustheit wird das System leichter und agiler als das bisheriger *HyQ* System.

MESSOR II

Der sechsbeinige Laufroboter *Messor II* wurde an der Poznan University of Technology in Poznan, Polen als flexible Forschungsplattform entwickelt [24]. Im Gegensatz zum Vorgänger *Messor* [222] wurde durch neue Motoren das Verhältnis aus Antriebsleistung zu Gewicht deutlich erhöht und so die Lauffähigkeiten gesteigert. Nicht nur die Antriebsleistung wurde verbessert, gleichzeitig wurde auch der gesamte Roboter

leichter und kompakter. Infolgedessen besitzt *Messor II* kürzer Beine, kann jedoch weiterhin wie *Messor* gut Treppen steigen. Das Gesamtgewicht konnte durch Leichtbau-Materialien, einem kompakten Zentralkörper sowie das neue Bein Design auf nur 2,5 kg reduziert werden. *Messor II* kann mit einer Kinect Kamera oder einem SwissRanger SR4000 zum Kartographieren ausgestattet werden. Die eingesetzten Dynamixel RC-28 Servomotoren wiegen nur 72 g pro Stück, besitzen einen internen Gelenkwinkel-Encoder sowie eine Drehmoment-Messung. Die Drehmoment-Messung ermöglicht es die Bodenkontaktkräfte zu schätzen und zusammen mit den Micro-Switch-Sensoren sicher den Bodenkontakt zu erkennen. Der gesamte Roboter wird durch ein PandaBoard mit einem ARM Cortex A9 Prozessor gesteuert. Dabei übernimmt dieses Board nicht nur die Bewegungssteuerung, sondern wird auch zur Erstellung der 2,5D Höhenkarte und die Lokalisierung mittels PTAM Algorithmus verwendet [129]. Der Laufroboter *Messor II* erreicht trotz seiner kleinen Größe und der günstigen Hardware-Komponenten einen beachtlichen Grad an Autonomie. Der Fokus der Forschung liegt vor allem auf der Umweltmodellierung und Lokalisierung in unbekanntem, unstrukturierten Umgebungen.

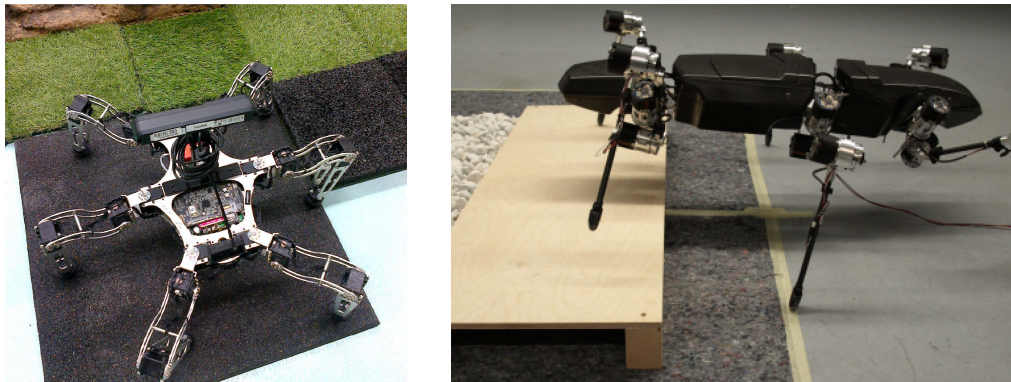


Bild A.19.: (links) Der sechsbeinige Laufroboter *Messor II* wurde als flexible Sensorplattform entwickelt. Quelle [17]; (rechts) Der sechsbeinige, biologisch inspirierte Laufroboter *HECTOR* wurde der indischen Stabheuschrecke nachempfunden. Quelle [167]

HECTOR

Die indische Stabheuschrecke *Carausius morosus* war ein wichtiges Vorbild bei der Entwicklung des sechsbeinigen Laufroboters *HECTOR* an der Universität Bielefeld [193]. *HECTOR* orientiert sich mit seinem biomechanischen Design (z.B. mit der Kinematik) sowie dem neurobiologischen Steuerungskonzept (z.B. mit der Beincoordination) stark an dieser Stabheuschrecke. Das System dient als Forschungsplattform für kognitive Ansätze und kann mit verschiedenen Sensorsystemen ausgestattet werden. Zum Beispiel werden kognitive Weiterentwicklungen des *WALKNET*, einem von der Stabheuschrecke abgeleiteten neuronalen Netz zur Koordination sechsbeiniger Laufbewegungen mit *HECTOR* evaluiert [57]. Das *WALKNET* besteht aus dezentralen Koordinationsregeln, die die Schwing- und Stemmphasen der Beine so synchronisieren, dass stabile, natürliche Laufmuster entstehen. Wissenschaftliche Herausforderungen, die mit *HECTOR* adressiert werden, sind das Überwinden von Spalten, Hindernissen und die abstrakte, kognitive Bewegungsplanung. *HECTOR* ist ca. 20 Mal so groß wie die Stabheuschrecke, folgt der kinematischen Struktur jedoch sehr genau. Die Beine sind wie bei Stabheuschrecke mit einem Anstellwinkel am mehrteiligen Zentralkörper angebracht. Der Körper selbst wurde aus einem speziellen mit Karbonfasern verstärktem Kunststoff hergestellt. Jedes Bein verfügt über drei Gelenke, die jeweils von einer kompakten Antriebseinheit (BioFlex

Rotatory Drive) angetrieben werden. Die Antriebseinheiten beinhalten neben einem bürstenlosen Gleichstrommotor, einem *Harmonic Drive Getriebe* auch eine Feder, die für eine inhärente Nachgiebigkeit sorgt. Integrierte Steuerplatinen erlauben es biologisch inspirierte, nachgiebige Regelungskonzepte wie z.B. *Local Positive Velocity Feedback* direkt auf der Antriebseinheit zu integrieren [192]. Für eine effiziente Kommunikation zwischen den Antriebseinheiten und zentralem Steuer-PC wurde ein neues BioFlex Bus-System auf Basis einer RS-485 Verbindung entwickelt. Im Gegensatz zu den meisten sechsbeinigen Laufrobotern besitzt *HECTOR* aktive Antriebe zwischen den drei Körpersegmenten. *HECTOR* kann sich an unbekannte, herausfordernde Umgebungen anpassen und bietet viele Möglichkeiten die mehrbeinige Lokomotion weiter zu erforschen.

A.3. Anwendungen des technischen Laufens

Die Faszination für Laufroboter wird zum einen davon getrieben die Lokomotion von Tieren und Insekten besser zu verstehen und technisch realisieren zu wollen. Zum anderen gibt es auch konkrete Anwendungsfelder, in denen Laufroboter oder laufende Fortbewegungsstrategien von Vorteil sind. Grundsätzlich wären Laufroboter wie Pferde auch zum Personentransport in und zwischen Städten denkbar, da hier jedoch Infrastruktur mit Straßen und Gleisen vorhanden ist, werden radgetriebene Systeme stets im Vorteil sein. Laufroboter können jedoch dort überzeugen, wo solche Infrastruktur nicht oder nicht mehr vorhanden ist. Die folgenden Anwendungsfelder sind für laufende Robotersysteme somit relevant.

- Transport in schwierigem Gelände
- Such- und Rettungsaufgaben
- Forstarbeiten und Landschaftspflege
- Inspektion von Bauten, Brücken und Industrieanlagen
- Exploration unter Wasser
- Exploration von planetaren Oberflächen
- Bau- und Abbrucharbeiten
- Landminensuche
- Exploration von Vulkanen
- Unterhaltung

Gemeinsam ist diesen Anwendungsfeldern, dass es keine Infrastruktur wie Straßen oder Wege gibt, keine detaillierten Karten existieren und es zahlreiche Hindernisse gibt. In der Abbildung A.20 sind einige der oben aufgelisteten Anwendungsfelder exemplarisch dargestellt um einen Eindruck von den schwierigen Umgebungsbedingungen zu vermitteln.

Der erfolgreiche, reale Einsatz von Laufrobotern ist je nach Anwendung sehr unterschiedlich ausgeprägt. In einigen Bereichen gibt es bereits kommerzielle Systeme, die am Markt erfolgreich sind, in anderen Bereichen sind es eher Forschungseinrichtungen, die Laufroboter in diesen Feldern evaluiert haben. In diesem Abschnitt werden im Weiteren konkrete Beispiele, Systeme und Anwendungen des technischen Laufens vorgestellt.



Bild A.20.: Typische Anwendungsfelder für mehrbeinige Laufroboter. Bildquellen [171]

Transport in unwegsamem, schwierigem Gelände Einige der in Abschnitt A.1 und A.2 vorgestellten Robotersysteme wurden speziell dafür entwickelt Transportaufgaben zu übernehmen. Das *Adaptive Suspension Vehicle* (siehe Abb. A.6 rechts) konnte auch in sehr schwierigem Gelände noch Lasten von bis zu 250 kg transportieren. Ähnlich wie bei den Laufrobotern von Boston Dynamics hatte vor allem das Militär Interesse an der Entwicklung des *Adaptive Suspension Vehicle* und finanzierte über die DARPA Teile der Forschung. Die größeren, vierbeinigen Laufroboter von Boston Dynamics, insbesondere *BigDog* und *LS3* (siehe Abb. A.21) wurden für den Lastentransport entwickelt. *LS3* kann bis zu 181 kg tragen und schafft eine Reichweite von 32 km [39]. Es gab bereits Feldversuche mit dem amerikanischen Militär. Trotz der beeindruckenden Laufleistung ist die Lautstärke der Hydraulikpumpe noch ein Problem für einen realen, militärischen Einsatz.



Bild A.21.: Boston Dynamics *LS3* wurde als robotischer Lastesel entwickelt. Quelle [39]

Such- und Rettungsaufgaben Viele der größeren Laufroboter wurden mit dem Ziel entwickelt Such- und Rettungsaufgaben (Search-and-Rescue) nach Naturkatastrophen wie z.B. Erdbeben, Gerölllawinen oder auch nach dem Einsturz von Gebäuden zu übernehmen. Ähnlich wie Such- und Rettungshunde können diese Roboter sich auf dem unwegsamen Gelände gut fortbewegen. Im Gegensatz zu Hunden werden die Roboter nicht müde und können auch in chemisch oder radioaktiv kontaminierten Gebieten eingesetzt werden. Jedoch stellen diese Anwendungsfelder auch sehr hohe Anforderungen an die Robustheit, Adaptivität und Bedienkonzepte, da vor Ort wenig Zeit und viel Stress unter den Einsatzkräften herrscht. Bisher wurden auch nur wenige Laufroboter mit umfangreicher Sensorik ausgestattet um ihre Umgebung vollständig zu erfassen und mit speziellen Sensoren z.B. nach Personen zu suchen. Die Roboter von Boston Dynamics wie z.B. *Spot*, aber auch *ANYmal*, *HyQ* und *LAURON V* könnten solche Aufgaben übernehmen. In der Abb. A.22 sieht man *LAURON V*, der zusammen mit Rettungskräften an der internationalen Katastrophenschutzübung TARANIS in Österreich teilnimmt.



Bild A.22.: *LAURON V* wurde bei der Katastrophenschutzübung TARANIS mit zahlreichen Sensoren ausgestattet um bei der Suche nach verletzten Personen zu unterstützen.

Forstarbeiten und Landschaftspflege Laufroboter eignen sich nicht nur in Gebieten mit vielen Hindernissen, sondern auch dort, wo große Steigungen vorkommen. Sie können zum Beispiel für die Landschaftspflege oder Erntearbeiten an steilen Hängen wie in Weingärten gut eingesetzt werden. Außerdem schonen sie den Untergrund, da sie den Waldboden nur punktuell belasten und nicht unnötig verdichten oder zerstören. Der laufende *Plustech Harvester* war ein sechsbeiniger, hydraulischer Prototyp, der 1995 von der finnischen Firma Plustech Oy erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt wurde. Plustech Oy ist eine Tochtergesellschaft von Timberjack Oy, einem Hersteller für Land- und Forstarbeitsmaschinen. Der *Plustech Harvester* hatte drei Gelenke pro Bein, einen hydraulischen Harvesterarm mit Werkzeug und konnte eine Laufgeschwindigkeit von ca. 1,0 m/s bei einem Gesamtgewicht von ca. 3500 kg erreichen [91]. Nach der Übernahme der Timberjack Oy durch die John Deere AG wurde die Arbeit an dem laufenden Harvester-Konzept eingestellt. Die geringe Laufgeschwindigkeit, hohen Kosten sowie die komplexe Steuerung machten es schwierig das System in der Forstwirtschaft zu etablieren. Dennoch konnte der Prototyp zeigen, dass Laufroboter in diesem Anwendungsfeld viele Vorteile bieten.

Inspektion von Bauten, Brücken und Industrieanlagen Laufroboter werden auch für die Inspektion von Brücken, Fassaden und Industrieanlagen wie z.B. großen Tanks oder Gebäuden eingesetzt. Gerade bei Brücken bietet die Flexibilität der komplexen Kinematik mit vier oder mehr Beinen große Vorteile. Die



Bild A.23.: Der *Plustech Harvester* wurde entwickelt um Wald- und Forstarbeiten in schwierigem Gelände durchzuführen und gleichzeitig den Waldboden zu schonen. Quelle [44]

Fußpunkte können so platziert werden, dass der Roboter auch Überhänge und Streben sicher überwinden kann. In der Arbeit von *Peters et al.* wird der Entwurf eines laufenden Roboters mit je drei Gelenken pro Bein für die Inspektion von alten Stahlbrücken vorgestellt [168]. Lauf- bzw. Kletterroboter sind jedoch nicht die einzige Möglichkeit solche Inspektionen oder Wartungsarbeiten autonom durchzuführen. Verschiedene Robotersysteme setzen zum Teil auch magnetische Räder oder Vakuumkammern ein um sich an Bauten und Gebäuden zu bewegen. Ein guter Überblick über den aktuellen Stand der Forschung bezüglich Lauf- und Kletterroboter für Wartungs- und Inspektionsaufgaben findet sich in der Arbeit von *Schmidt und Berns* [189].

Exploration unter Wasser In der Regel werden für Explorations- oder Inspektionsaufgaben in der Tiefsee spezielle UUVs (Unmanned Underwater Vehicle) eingesetzt. Diese können sich frei unter Wasser mittels Propeller bewegen und entsprechend der Aufgabe optimal positionieren bzw. ausrichten. Jedoch müssen sie aufgrund von Strömungen ständig ihre Position aktiv korrigieren. Laufroboter, die auf dem Meeresgrund laufen, können fest an einer Position bleiben, brauchen somit weniger Energie und bilden eine stabilere Basis für Manipulationsaufgaben unter Wasser. Im Abschnitt A.1 wurde bereits der *Aquarobot* vorgestellt, eine früher Unterwasser Laufroboter für Inspektions- und Explorationsaufgaben. Aktuell der bekannteste und fortschrittlichste Unterwasser-Laufroboter ist der *Crabster CR200* (siehe Abb. A.24). Dieser sechsbeinige Laufroboter verfügt über zahlreiche Sensoren um die Umgebung unter Wasser zu erfassen und zwei spezielle Vorderbeine, mit denen er Manipulationsaufgaben ausführen kann. Der *Crabster CR200* wurde bereits mehrfach erfolgreich im offenen Meer eingesetzt und wird kontinuierlich weiterentwickelt [166]. Neben klassischen Laufrobotern werden auch andere Lokomotionskonzepte unter Wasser erforscht. Spannend ist z.B. die Entwicklung von weichen, nachgiebigen Unterwasser-Laufrobotern [43][137]. Einen aktuellen Überblick über die Forschungsaktivitäten in diesem Bereich liefert [136].

Exploration von planetaren Oberflächen Typischerweise werden zur Erkundung von planetaren Oberflächen eher Rover, also radgetriebene Systeme eingesetzt. Das liegt daran, dass jeder zusätzliche Freiheitsgrad weitere Kosten und Risiken für Weltraummissionen mit sich bringt. Dennoch wurden und werden Laufroboter für die Erkundung von planetaren Oberflächen entwickelt. Interessant ist, dass Laufroboter auch

A. Mehrbeiniges Laufen in der technischen Umsetzung

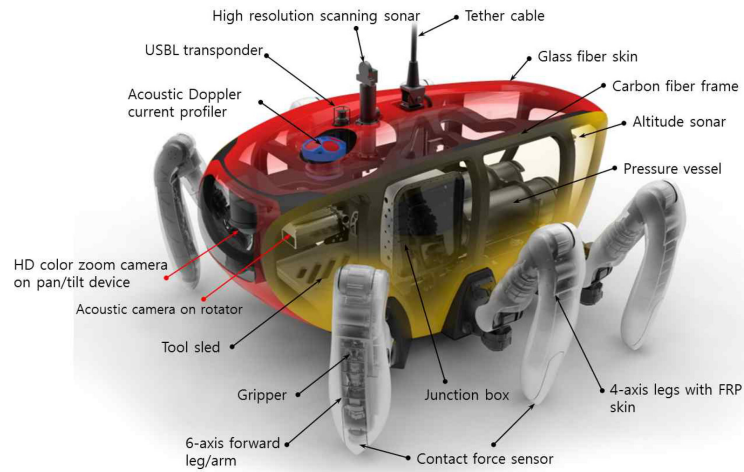


Bild A.24.: Fortschrittlicher, sechsbeiniger Unterwasser-Laufroboter *Crabster CR200* aus Süd-Korea. Quelle [114]

in Krater hinabsteigen können und Proben von Felswänden nehmen können. Das DFKI in Bremen entwickelte hierfür z.B. den *SpaceClimber* bzw. *CREX* und auch das JPL in den USA konzipierte die Laufroboter der *LEMUR* Reihe speziell für planetare Explorationsmissionen (siehe Abschnitt A.2). Der sechsbeinige Laufroboter *LAURON V* wurde bei dem DLR SpaceBot Cup 2013 und dem DLR SpaceBot Camp 2015 eingesetzt um die gestellten Explorationsaufgaben autonom zu meistern. *LAURON* war der einzige Laufroboter in den beiden Wettbewerben. Alle anderen Teams setzten radgetriebenen Rover ein. Dennoch konnte *LAURON V* vor allem im DLR SpaceBot Camp 2015 zeigen, dass Laufroboter gut für autonome Sample-Return-Missionen geeignet sind [Heppner et al., 2017].

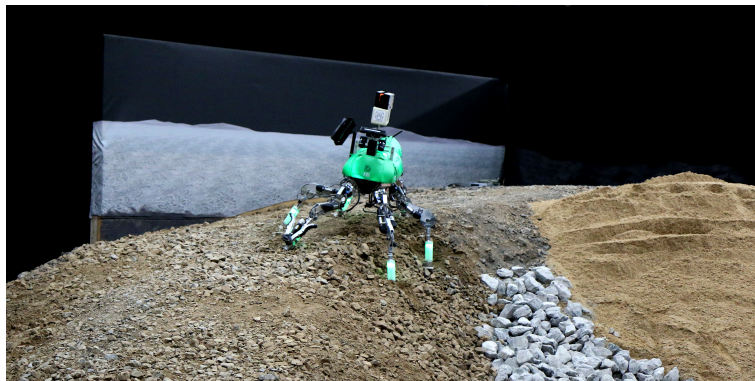


Bild A.25.: *LAURON V* beim DLR SpaceBot Camp 2015 läuft einen nachgebildet Kratenhang hinab.

Bau- und Abbrucharbeiten Auf Baustellen ist häufig wenig Platz und die schweren Baumaschinen müssen große Umwege fahren um an die richtigen Stellen zu kommen. Bei Bau- oder Abbrucharbeiten an steilen Hängen besteht für klassische Baumaschine erhöhte Kippgefahr, da diese ihren Schwerpunkt kaum verändern können. Seit mehr als 40 Jahren gibt es für solche Arbeiten sogenannte Schreitbagger. Diese großen Baumaschinen sind in der Lage mit ihren hydraulischen Beinen beachtliche Hindernisse zu überwinden und an sehr steilen Hängen zu arbeiten. Marktführer sind die Schreitbaggern der Menzi Muck AG aus der Schweiz [147]. Bereits 1966 wurde der erst Schreitbagger ausgeliefert. Mit über 6000 verkauften

Einheiten alleine von der Firma Menzi Muck sind Scheitbagger ein Beispiel für bereits etablierte, kommerziell erfolgreiche Laufroboter.

Landminensuche Der Einsatz von Laufrobotern für die Landminensuche hat einen entscheidenden Vorteil: die Füße berühren nur punktuell den Boden. Das verringert das Risiko versehentlich auf eine unentdeckte Landmine zu treten. Außerdem kann sich ein Laufroboter mit Hilfe von Bahnplanungsalgorithmen gezielt Fußpunkte aussuchen und so weiter die Gefahr minimieren auf eine Mine zu treten [22]. Es gibt rad- oder kettenbetriebene Minenräumergeräte, die auf flachen Gelände und bei wenig Vegetation eingesetzt werden können, jedoch scheitern diese Systeme in rauem, unwegsamem Gelände. Häufig liegen Landminen auch in bergigen Gebieten mit schwieriger Vegetation. Entsprechend wäre der Einsatz von Laufrobotern zur Minensuche sehr vorteilhaft. Die Laufroboter *COMET II*, *VK-I* und *SILO6* (siehe *COMET II* in Abb. A.26) sind Beispiele für Laufroboter, die speziell für den Einsatz zur Landminensuche entwickelt wurden [158][120][59]. Leider haben es diese Systeme noch nicht in reale Anwendungen geschafft und wurden meist nur im Rahmen von Feldversuchen von Forschungsvorhaben eingesetzt.

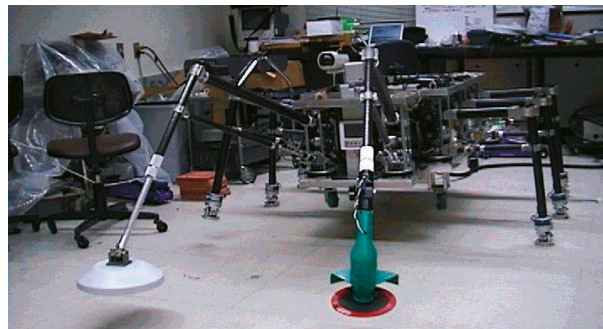


Bild A.26.: Der sechsbeinige Laufroboter *COMET II* wurde in Japan entwickelt um Landminen zu suchen. Quelle [195]

Exploration von Vulkanen und Kratern Laufroboter können nicht nur für Explorationsmissionen auf fremden Planeten, Asteroiden oder Monden eingesetzt werden, sondern auch auf der Erde bei der Erkundung und Erforschung von aktiven Vulkanen. Die Messung von Gasen oder auch die Entnahme von Proben ist insbesondere im Inneren des Kraters und an den Steilwänden interessant. Ein Laufroboter kann beim Abstieg in einen solchen Krater zusätzlich über ein Seil abgesichert werden. Alternativ müssen die Greifer bzw. Werkzeuge einen sicheren Halt im Gestein garantieren. In Abschnitt A.1 wurde bereits der *DANTE II* Roboter vorgestellt, der erfolgreich in einen Vulkankrater hinab und wieder aufgestiegen ist (siehe links in Abb. A.7). Dieses System wurde von einem speziellen Seil gesichert und auch versorgt. Wie schwierig diese Aufgabe ist zeigt auch, dass die erste Version des *DANTE* Roboters während der Mission in den Krater gestürzt ist, weil das Sicherungsseil gerissen ist. Der im Abschnitt A.2 präsentierte *LEMUR II* Roboter des NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) wurde im Kontext von Weltraummissionen ebenfalls für den Abstieg in Krater entwickelt. Dieses System verfügt über spezielle Greifer, die sich im Gestein festhalten können.

Unterhaltung und Spielzeuge Laufen fasziniert Erwachsene wie Kinder gleichermaßen. Deshalb überrascht es nicht, dass es zahlreiche Laufroboter Spielzeuge gibt. Diese Systeme sind die ersten kommerziell

A. Mehrbeiniges Laufen in der technischen Umsetzung

erfolgreichen Laufroboter im Massenmarkt. Sehr einfache, günstige Systeme wie die *Hexabugs* von Innovation First International, Inc., USA, werden als Spielzeug für unter 20 € angeboten [93]. Weitere günstige Systeme sind z.B. die *Kamigami* Roboter von Dash Robotics, Inc., USA [116]. Dies sind kleine Laufroboter, die nach dem Vorbild des in Abschnitt A.2 vorgestellten *DASH* Roboter entwickelt wurden. Es gibt aber auch größere, komplexere Roboter wie den Pleo Laufroboter von der Firma Innvo Labs Corporation, USA, der einem Dinosaurier nachempfunden ist [172]. Allerdings wurde der Verkauf des Pleo mittlerweile eingestellt, da der Markt für 400-500 € teure Spielzeug-Laufroboter nicht groß genug ist. Weiter gibt es auch sehr komplexe, teure mehrbeinige Laufroboter wie z.B. die Systeme von Lynxmotion [140] oder auch den *aibo* von SONY [206], die nicht nur von Privatpersonen, sondern auch von Forschungseinrichtungen und Universitäten genutzt werden.



Bild A.27.: Entertainment Laufroboter: (links) *Hexabugs* der Firma Innovation First International, Inc.; (mittig) *Kamigami* eine Variante des *DASH* Roboters; (rechts) neueste Generation des berühmten SONY *aibo*, [122].

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Faszination Laufen: (links) Geparden beeindruckt mit ihrem schnellen, dynamischen Laufen; (rechts) Ameisen können nahezu jedes Hindernis überwinden. | 9 |
| 1.2 | Konzeptdarstellung: Modellierung, Metriken, Analysen und Methoden für effizientes, mehrbeiniges Laufen | 10 |
| 1.3 | Zur Evaluation eingesetzter sechsbeiniger Laufroboter <i>LAURON</i> | 11 |
| 2.1 | Beinbasierte Taxonomie der terrestrischen Lokomotionsarten. | 17 |
| 2.2 | Unterscheidung der Lokomotion nach kinematischer Anordnung der Beine [6]: (links) Reptilien oder Amphibien haben die Beine seitlich am Körper ausgestreckt und laufen somit sehr breitbeinig, (mittig) kleinere Säugetiere wie Mäuse laufen mit den Beinen unterhalb ihres Körpers, die Beine sind auch stets gebeugt, (rechts) größere Säugetiere wie Pferde oder Elefanten haben ihre Beine ebenfalls unterhalb des Körpers, diese sind jedoch meist gestreckt. Quelle [6] | 18 |
| 2.3 | Kinematische Taxonomie der terrestrischen Lokomotionsarten. | 19 |
| 2.4 | Stabilitätsbasierte Taxonomie der terrestrischen Lokomotion. | 20 |
| 2.5 | Darstellung einer Schwing- und Stembewegung bei der mehrbeinigen Lokomotion: (blaue gepunktete Linie) Schwingbewegung in der Luft ohne Bodenkontakt, (rote Linie) Stembewegung mit Bodenkontakt, (grüne Punkte) <i>AEP</i> (Anterior Extreme Position) und <i>PEP</i> (Posterior Extreme Position) definieren die Start- und Endpunkte der Schwing- und Stembewegung im lokalen Beinkoordinatensystem. | 21 |
| 2.6 | Darstellung der Schwing- und Stembewegung einer galoppierenden Ziege. | 22 |
| 2.7 | Beispiele für Schwing- und Stemmtrajektorien:(links) rechteckige Trajektorie, (mittig links) halbkreisförmige Trajektorie, (mittig rechts) halbelliptische Trajektorie, (rechts) sinusförmige Trajektorie. | 23 |
| 2.8 | Das <i>Gait Diagram</i> veranschaulicht die Schwing- und Stemmphasen aller Beine im zeitlichen Verlauf. Gestrichelte Linien mit Zahlen zeigen hier die Effekte der sogenannten <i>Cruse Regeln</i> zur Koordination eines natürlichen Laufmusters bei sechsbeinigen Insekten [54]. Diese Regeln wurden von neurowissenschaftlichen Untersuchungen bei der Stabheuschrecke abgeleitet. Quelle [56]. | 24 |
| 2.9 | Übersicht aller <i>Creep-Gait</i> -Laufmuster für einen vierbeinigen Laufroboter. Quelle [203] . . . | 24 |
| 2.10 | Auswahl der wichtigsten dynamischen, vierbeinigen Laufmuster. Die rote, vertikale Linie im <i>Gait Diagram</i> entspricht der Darstellung rechts neben dem <i>Gait Diagram</i> . Quelle [50] . . | 25 |
| 2.11 | Sechsbeinige Laufmuster: Schwarze Balken = Bodenkontakt: (links) Tripod mit <i>Dutyfactor</i> $\beta = 0,5$, (mittig) Tetrapod mit <i>Dutyfactor</i> $\beta = 0,67$, (rechts) Pentapod mit <i>Dutyfactor</i> $\beta = 0,83$. Quelle [Hel12] | 26 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.12 | Die <i>Aufstandsfläche</i> ist als konvexe Hülle aller Bodenkontakte definiert (schwarze Beine haben Bodenkontakt): Aufstandsflächen für eine vierbeinige Kinematik (obere Reihe), Aufstandsflächen für eine sechsbeinige Kinematik (untere Reihe) | 27 |
| 2.13 | Maximale Laufgeschwindigkeit von Säugetieren im Vergleich. Quelle [8] | 28 |
| 2.14 | Die <i>dynamische Ähnlichkeit</i> lässt sich anhand der Geraden bzw. dem Zusammenhang der <i>Froude Number</i> und der relativen <i>Schrittweite</i> (relative stride length) gut erkennen. | 29 |
| 2.15 | Das einfache Feder-Masse-Modell zur Beschreibung der mehrbeinigen Lokomotion lässt sich skalierungsinvariant auf eine Vielzahl von Arten anwenden. Quelle [99] | 29 |
| 2.16 | Zusammenhang des Energieverbrauchs (Metabolic Rate) und der Laufgeschwindigkeit von speziell trainierten Pferden, die mit verschiedenen Geschwindigkeiten fest in einem Laufmuster laufen. Quelle [8] | 30 |
| 2.17 | Der normierte Energieverbrauch pro Distanz (Cost of locomotion per distance) im Verhältnis zum Körpergewicht (Body mass) zeigt einen spannenden artenübergreifenden und skalierungsinvarianten Zusammenhang bei der mehrbeinigen Lokomotion. Quelle [99] | 31 |
| 2.18 | Normierte Energieverbrauch pro Distanz für eine Vielzahl unterschiedlich schwerer Tiere, Insekten und Reptilien. Untere Kurve stellt die resultierende Energieeffizienz dar. Quelle [8] | 32 |
| 3.1 | (links) Antriebskonzept nach <i>Tschebyschow</i> aus dem Jahr 1850. Quelle [239], (rechts) Beim <i>OSU Hexapod</i> aus dem Jahr 1977 stand die Regelung der komplexen Kinematik im Fokus der Forschung. Quelle [211] | 34 |
| 3.2 | Die Vielfalt mehrbeiniger Laufroboter ist faszinierend groß: von links oben nach rechts unten mit Bildquellen: <i>TITAN XIII</i> [126], <i>ANYmal</i> [104], <i>SILO6</i> [60], <i>AMOS-WD06</i> [142]; <i>SpaceClimber</i> [18], <i>DASH</i> [31], <i>Hexabot</i> [70]; <i>BigDog</i> [36], <i>DLR-Klabber</i> , [86], <i>HyQ</i> [199], <i>Pleurobot</i> [118]; <i>Messor II</i> [17], <i>RoboSimian</i> [92], <i>LAURON</i> , <i>RHex</i> [225]; <i>Crabster CR200</i> [114], <i>CREX</i> [180], <i>MIT Cheetah 2</i> [71]; <i>Snapbot</i> [123], <i>Hexbugs</i> , <i>LEMURII</i> [153]; <i>HECTOR</i> [167], <i>Snake Monster</i> [215], <i>SpotMini</i> [39]. | 36 |
| 3.3 | (links) Einfacher Laufroboter mit jeweils einem Motor und einem weiteren passiven Gelenk pro Bein. Quelle [108]; (rechts) Selbststabilisierende Zyklen anhand der Bewegung des Zentralkörpers entlang der Y-Achse dargestellt; (rechts oben) die Veränderung der Amplitude und Frequenz der Lokomotion sind gut zu erkennen; (rechts unten) Phasendiagramm zeigt deutlich die zwei selbststabilisierenden Zyklen. Quelle [108] | 38 |
| 3.4 | (links) Verlauf der Fitnessfunktion des evolutionären Algorithmus mittels <i>CMA-ES</i> für die Entwicklung der <i>SpaceClimber</i> Kinematik. Quelle [182]; (rechts) finale <i>SpaceClimber</i> Kinematik nach der evolutionären Optimierung. Quelle [182] | 39 |
| 3.5 | Arbeitsraumoptimierung für den sechsbeinigen Laufroboter <i>DLR-Krabbler</i> . Quelle [86] | 40 |
| 3.6 | Dynamisch ähnliche Lokomotion des <i>Pleurobot</i> : Bei der Entwicklung des <i>Pleurobot</i> wurde die Kinematik anhand von CT-Aufnahmen und einem genetischen Optimierer dem Salamander nachempfunden. Weiter wurde eine dynamische Skalierung vorgenommen um eine möglichst gute Übereinstimmung bei der Lokomotion zu erreichen. (links) Originalaufnahmen des Salamander bei der Lokomotion (a) seitlich, (b) von oben. (rechts) Bewegungen des Roboters durch Abspielen der gleichen Gelenkwinkelfolgen des Salamanders. (c) von oben, (d) seitlich. Quelle [118] | 41 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.7 | (links) <i>Die Static Stability Margin (SSM)</i> ist nicht gut geeignet um die Stabilität eines Laufroboters am Hang zu optimieren: siehe Teil a); die Stabilität kann durch den Einsatz von geeigneten Stabilitätsmetriken signifikant verbessert werden: siehe Teile b), die erhöhte Stabilität in b) schränkt jedoch die Beinbewegungen stark ein, da diese an ihre kinematischen Arbeitsraumgrenzen stoßen; die Kinematik kann durch ausfahrbare Beinsegmente erweitert werden um sicher am Hang zu laufen: siehe Teil c) Quelle [97]; <i>TITAN VII</i> Laufroboter mit ausfahrbaren Beinsegmenten am Hang. Quelle [94] | 43 |
| 3.8 | (links) Mögliche Kniegelenk-Konfigurationen eines typischen, vierbeinigen Laufroboters wie z.B. von <i>HyQ</i> Quelle [77]; (rechts) Sechsbeiniger Laufroboter <i>MESSOR</i> während der Evaluation der <i>PSO</i> -basierten Haltungskontrolle zur Verbesserung der Stabilität in schwierigem Gelände. Quelle [23] | 44 |
| 3.9 | (links) Profile der horizontalen (rote, geschlossene Linien) und vertikalen (blaue, gepunktete Linien) Kraft beim Laufen: (oben links) Profile des <i>SLIP</i> -Modells, (oben rechts) Kraftprofile der Kakerlake, (unten) Kraftprofile des <i>DASH</i> Laufroboters, der mit nur einem Motor Geschwindigkeiten von 1,5 m/s erreicht. Quelle [31]; (rechts) <i>Ranger</i> , einer der effizientesten Laufroboter überhaupt mit einer <i>TCoT</i> von 0,19 beim Ultra-Marathon. Quelle [27] | 45 |
| 3.10 | <i>RHex</i> bzw. <i>XRL</i> (eine Variante des <i>RHex</i> Roboters) ist in der Lage präzise, dynamische Bewegungen ausführen. Quelle [113] | 46 |
| 3.11 | Der Laufroboter <i>ANYmal</i> kann durch die integrierte Kraftregelung auch im Sand robust und effizient Laufen. Quelle [131] | 47 |
| 3.12 | Darstellung der Verlustleistungen, der vier Designregeln zur Steigerung der Energieeffizienz sowie der Umsetzung im <i>MIT Cheetah</i> . Quelle [201] | 48 |
| 3.13 | Entwicklung der Laufroboterreihe <i>LAURON</i> : (links) Holzmodell <i>INSECT</i> , (mittig links) <i>LAURON I</i> Quelle [110], (mittig rechts) <i>LAURON II</i> , (rechts) <i>LAURON III</i> | 49 |
| 3.14 | Vierte Generation des sechsbeinigen Laufroboters <i>LAURON</i> : <i>LAURON IVc</i> besitzt eine biologisch inspirierte Kinematik mit einer robusten Mechanik, die den Einsatz des Roboters auch in schwierigen Gelände möglich macht. | 50 |
| 3.15 | Evolutionäre Entwicklung der <i>LAURON V</i> Beinkinematik: (links) Vorbild indische Stabheuschrecke, (mittig) <i>LAURON IVc</i> Bein mit den drei Gelenken ALPHA, BETA, Gamma, (rechts) <i>LAURON V</i> Bein mit den vier Gelenken DELTA, ALPHA, BETA, GAMMA. Quelle [Roennau et al., 2014c] | 51 |
| 3.16 | Robuster und leichter Zentralkörper von <i>LAURON V</i> . Quelle [Roennau et al., 2014c] | 52 |
| 3.17 | Sechsbeiniger Laufroboter <i>LAURON V</i> während des DLR SpaceBot Camps 2015 mit 3D-Laserscanner auf dem Rücken. | 52 |
| 3.18 | Sechsbeiniger Laufroboter <i>Crabster CR200</i> bei Versuchen in einem tiefen Wasserbecken. Quelle [234] | 53 |
| 4.1 | Die Körperlänge ist oft nicht einfach und intuitive zu ermitteln: (links) Pferd: Rumpflänge vs. Rumpflänge mit Kopf vs. Gesamtlänge inklusive Schweif, (mittig) Krokodil: Rumpflänge vs. Rumpflänge mit Kopf vs. Gesamtlänge mit Schwanz, (rechts) Stabheuschrecke: Kopf mit Prothorax, Mesothorax und Metathorax vs. Gesamtlänge inklusive Abdomen. | 58 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.2 | Der Gewichtsvergleich großer Säugetiere mit kleinen Insekten zeigt wie groß die Vielfalt mehrbeiniger Lokomotion aussehen kann (Hinweis: die Größenverhältnisse in der Darstellung sind nicht richtig skaliert). | 59 |
| 4.3 | Die effektiven Beinlängen (rot gestrichelt) bei Vertebraten und Arthropoden unterscheiden sich stark von den normalen Beinlängen (grün). | 60 |
| 4.4 | <i>Static Stability Margin (SSM)</i> für mehrbeinige Laufroboter definiert klar und eindeutig die Stabilität für langsame Laufbewegungen auf einer Ebene. | 63 |
| 4.5 | Vergleich der <i>Static Stability Margin</i> (links) und der <i>Longitudinal Stability Margin</i> (rechts): Bei der <i>LSM</i> liegt der Fokus stärker auf der Laufbewegung. Quelle [203] | 63 |
| 4.6 | Darstellung einer Aufstandsfläche mit den drei Kippachsen K_1 , K_2 und K_3 | 64 |
| 4.7 | Die <i>Energy Stability Margin</i> wurde entwickelt, weil die rein geometrische <i>Static Stability Margin</i> in Schräglagen keine zulässigen Werte ermittelt. Der in dieser Abbildung nach der <i>SSM</i> projizierte Schwerpunkt liegt in der Mitte der Aufstandsfläche. Somit wäre diese laut <i>SSM</i> die stabilste Stellung des Zentralkörpers. Es ist jedoch intuitiv klar, dass der Roboter in der Position leichter nach hinten als nach vorne kippen kann. Quelle [148] | 65 |
| 4.8 | Die <i>Energy Stability Margin</i> betrachtet die benötigte potentielle Energie um den Roboter entlang der Kippachse K_1 oder K_2 zu kippen. Der Höhenunterschied h_2 ist deutlich größer als h_1 und der Roboter kippt entsprechend leichter über die hintere Achse $\Delta h = h_2 - h_1$. Für die Berechnung der relevanten Höhen wird der jeweilige Kippwinkel θ_i und die Hilfsgrößen h_{CoM_i} benötigt. Nach <i>ESM</i> liegt die optimale Stellung des Schwerpunktes in diesem Fall entlang der gestrichelten Kurve Q . Der Gravitationsvektor F_G ist wichtig um den Kippwinkel zu bestimmen. Quelle (modifiziert) [148] | 66 |
| 4.9 | Die <i>Dynamic Stability Margin (DSM)</i> ist eine einfache Erweiterung der <i>Static Stability Margin (SSM)</i> . Bei der <i>Dynamic Stability Margin</i> erfolgt die Projektion entlang des resultierenden Kraftvektors aus F_G , F_I und F_E | 66 |
| 4.10 | Kontaktpunkte P_i übertragen Kräfte F_i vom Boden auf den Roboter. Quelle [203] | 68 |
| 4.11 | Vergleich <i>Zero Moment Point (ZMP)</i> und <i>Center of Pressure (CoP)</i> . Quelle [220] | 69 |
| 4.12 | Grundprinzip der <i>Force Angle Stability Margin</i> . Quelle (modifiziert) [162] | 70 |
| 4.13 | Die <i>Force Angle Stability Margin</i> erfasst gut den negativen Einfluss eines erhöhten Schwerpunktes durch die Veränderung des <i>Kippwinkels</i> θ . Quelle (modifiziert) [162] | 71 |
| 4.14 | Die Berechnung der <i>Force Angle Stability Margin</i> im allgemeinen 3D-Fall bedarf einiger geometrischer Vorberechnungen. Quelle (modifiziert) [162] | 72 |
| 4.15 | Laufgeschwindigkeiten sind nicht konstant: (links) Darstellung der Yaw-Drehbewegungen der amerikanischen Kakerlake während des Laufens, (rechts) Auswirkungen auf die Geschwindigkeiten: (rechts oben) Zwei Datensätze mit oszillierenden Laufgeschwindigkeiten in Vorwärtsrichtung, (rechts mittig) Geschwindigkeiten orthogonal zur Laufrichtung mit Oszillation des Körpers, (rechts unten) Winkelveränderungen in Yaw Richtung aufgrund der Oszillationen beim Laufen. Quelle [99]. | 75 |
| 4.16 | Geschwindigkeitsmessung des Laufroboters <i>LAURON IVc</i> : Die Geschwindigkeit schwankt während der Laufbewegung und ist wie bei Tieren und Insekten durch Oszillationen nicht konstant. | 76 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.17 | Specific Resistance verschiedener Fortbewegungsarten: durch die Normierung wird ein Vergleich zwischen sehr unterschiedlichen Systemen möglich. Quelle [218] | 79 |
| 4.18 | Specific Resistance zur Optimierung der Lokomotionsparameter auf unterschiedlichen Untergründen. Quelle [187] | 80 |
| 4.19 | Cost of Transport für Tiere, Insekten, Maschinen und Laufroboter. Quelle [103] | 82 |
| 4.20 | Einfaches Beinmodell zur Berechnung der Arbeit im Bein während der Schwing-Phase. Annahme das System bewegt sich mit einer konstanten Geschwindigkeit V vorwärts. Damit lässt sich abschätzen $V = S/l\beta T$ mit der <i>Schrittweite</i> S , der Beinlänge l , <i>Dutyfactor</i> β und der <i>Zykluszeit</i> T . Weiter sind die Bodenkontaktkraft $N_i(t)$ sowie die Masse eines Beines m_l sowie die karthesische Koordinate x_i dargestellt. Quelle [156] | 84 |
| 4.21 | Analyse der optimalen Laufparameter mittels <i>Cost of Transport nach Nishii</i> . Quelle [156] | 86 |
| 4.22 | Aufwändige Messmethoden sind notwendig um bei Lebewesen die <i>Metabolic Rate</i> zu bestimmen, die wiederum zur Berechnung der <i>Metabolic Cost of Transport</i> benötigt wird. Quelle [8] | 88 |
| 4.23 | Untersuchungen bei Pferden zeigen, dass die Natur stets die Energieeffizienz durch Veränderungen der Lokomotionsparameter optimiert. Quelle [100] | 89 |
| 4.24 | Dynamische Berechnung des Roboterschwerpunkts CoM_r | 95 |
| 4.25 | Erweiterte Aufstandsfläche A_{ext} : Konvexe Hülle aller Punkte P_{iAEP} und P_{iPEP} (grüne Fläche). Der Unterschied zur Aufstandsfläche (blau gestrichelt) ist deutlich zu erkennen. | 97 |
| 4.26 | Ausdehnung $X_{A_{ext}}$ und $Y_{A_{ext}}$ der erweiterten Aufstandsfläche A_{ext} | 97 |
| 4.27 | Vergleich verschiedener Lokomotionsapparate anhand der erweiterten Aufstandsfläche A_{ext} sowie dessen X-Ausdehnung $X_{A_{ext}}$: (oben links) Stabheuschrecke, (oben mittig) Katze, (oben rechts) Elefant, (unten links) Laufroboter ANYmal (modifiziert aus Quelle [105]), (unten rechts) Laufroboter LAURON V. | 98 |
| 4.28 | Abstraktion vom detaillierten Robotermodell zum modellbasierten Lokomotionsmodell. | 99 |
| 4.29 | Mehrbeiniges, abstraktes Lokomotionsmodell für mehrbeinige Laufroboter. | 100 |
| 4.30 | Der <i>Kippwinkel</i> θ der <i>Force Angle Stability Margin</i> ist skalierungsinvariant. | 101 |
| 4.31 | Die Kippdistanz Δ der <i>Distance Force Stability Measure</i> kann geometrisch interpretiert und hergeleitet werden. | 102 |
| 4.32 | Beispielhafte Darstellung verschiedener mehrbeiniger Laufroboter-Kinematiken zur Veranschaulichung der Normierungsprobleme bei Verwendung der Körperlänge oder der Schulterhöhe. | 104 |
| 4.33 | Die neue <i>Normalised Walking Velocity</i> nutzt zur Normierung die Ausdehnung der erweiterten Aufstandsfläche $X_{A_{EX}}$. So können mehrere, wichtige Aspekte des Lokomotionsapparats bei der Normierung berücksichtigt werden. | 105 |
| 5.1 | Dynamische Simulationsumgebungen sind wichtige Werkzeuge für die Analyse von komplexen Laufrobotern wie LAURON. Quelle [Sut12] | 109 |
| 5.2 | Swing- und Stemmtrajektorie des Laufroboters LAURON IVc mit eingezeichnetem P_{AEP} und P_{PEP} . Quelle (modifiziert) [Hep11] | 110 |
| 5.3 | Die interne Motorstrommessung des UCoM, Universal Controller Module, konnte durch eine nichtlineare Fitting-Funktion deutlich verbessert werden. | 111 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.4 | Approximation des dynamischen Modells durch Zerlegung in geometrische Grundkörper und deren Schwerpunkte. Quelle [Kon10] | 112 |
| 5.5 | Einsatz eines 2D-Linienscanners zur Erfassung der Position des Laufroboters. Aus der präzisen Positionsmessung kann anschließend die Laufgeschwindigkeit ermittelt werden. Quelle [Hep11] | 113 |
| 5.6 | Die externen und internen Kräfte, die auf den Laufroboter wirken können durch die Bodenreaktionskräfte mit Kraftsensoren in den Füßen erfasst werden. | 114 |
| 5.7 | Oberflächendarstellung der Arbeitsräume der Laufroboterbeine von <i>LAURON IVc</i> (links) und <i>LAURON V</i> (rechts). Deutlich zu erkennen ist die komplexere Form des Arbeitsraumes von <i>LAURON V</i> , die durch die Redundanz in der Kinematik entsteht. Quelle [Koc10] | 116 |
| 5.8 | (links): roter, horizontaler Schnitt durch den Arbeitsraum von <i>LAURON V</i> , (rechts): grüner, vertikaler Schnitt durch den Arbeitsraum von <i>LAURON V</i> , siehe Abbildung 5.7. Quelle [Koc10] | 116 |
| 5.9 | Analyse des vereinfachten Arbeitsraumes anhand eines Schnitts: (links) Extraktion möglicher <i>Schritthöhen</i> , (rechts) Extraktion möglicher <i>Schrittweiten</i> in Y-Richtung. Quelle (modifiziert) [Koc10] | 117 |
| 5.10 | Analyse der kinematischen Fähigkeiten am Beispiel des <i>LAURON V</i> Beins. | 120 |
| 5.11 | Kartesische Darstellung von Bewegungstrajektorien. | 121 |
| 5.12 | Definition einer Bewegungstrajektorie anhand der vier Basis-Punkte BP_0, BP_1, BP_2 und BP_3 mit den dazugehörigen Segmenten S_0, S_1, S_2 und S_3 | 122 |
| 5.13 | Eigenschaften der Beziérkurven: (links) Die Gradient-Punkte beeinflussen die Krümmung des Segments im Basis-Punkt. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2014a]: (links oben) Gradient-Punkte zu einem Basis-Punkt liegen auf einer Linie - somit ist ein stetiger Übergang der Segmente einfach realisierbar, (links mittig) der Abstand der Gradient-Punkte beeinflusst die Krümmung, (links unten) liegen die Gradient-Punkte nicht auf einer Geraden können auch nicht-stetige Übergänge zwischen Segmenten erzeugt werden, (rechts) das Sechsertupel $(KP_i, GP_{ji}, SP_{ji}, SP_{jj}, GP_{jj}, KP_j)$ definiert die Form eines Segments. Quelle [Hel12] | 122 |
| 5.14 | Komplexe, leicht veränderbare Bewegungstrajektorie: Modellierung einer Bewegungstrajektorie anhand der Laufbewegung bei Hunden. | 123 |
| 5.15 | Der Vergleich der drei Physik-Engines <i>Bullet</i> , <i>ODE</i> , <i>PhysX</i> beim Bau einer Pyramide offenbart, dass alle Schwierigkeiten mit numerischer Stabilität haben. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2013b] | 125 |
| 5.16 | Stapel Experiment zeigt die Schwierigkeiten aller Physik-Engines mit multiplen Kontaktkräften. Quelle [Sut12] | 125 |
| 5.17 | Nichtlineare Rechenzeit bei hoher Simulations-Güte von <i>ODE</i> kritisch für Laufroboter-Simulation. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2013b] | 126 |
| 5.18 | Kollisionen kleiner Grundkörper mit einem Oberflächen-Mesh werden je nach Auflösung des Meshes nicht erkannt. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2013b] | 126 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.19 | Reibungsmodell: (links) Coulombschen Reibungskegel, (rechts) vereinfachte Reibungs- pyramide. Die externe Störkraft F_2 kann von beiden Reibungsmodellen kompensiert werden. Die Störkraft F_1 kann bei dem richtig modellierten Reibkegel (links) von der Reibkraft F_{f_1} nicht kompensiert werden. Die einfache Reibpyramide (rechts) kompensiert diese Störkraft jedoch mit der zu großen Reibkraft F_{f_1} und das Objekt würde sich fälschlicherweise bewe- gen. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2013b] | 127 |
| 5.20 | Reibungsmodell: Verwendete Reibungsmodelle im Vergleich zur Referenz, dem Coulomb- schen Reibungsmodell. Quelle (modifiziert) [Sut12] | 128 |
| 5.21 | <i>RoadS</i> Software-Gesamtarchitektur. Quelle (modifiziert) [Sut12] | 129 |
| 5.22 | Abstrahiertes Laufrobotermodell in <i>RoadS</i> : (links) Visualisierung eines sechsbeinigen Laufro- boters, (rechts) Darstellung des ActiveModels eines sechsbeinigen Laufroboters. Quelle (modifiziert) [Sut12] | 129 |
| 5.23 | Integration der <i>Bullet</i> Physik-Engine in die <i>RoadS</i> Simulationsumgebung. Quelle (modifi- ziert) [Sut12] | 130 |
| 5.24 | <i>RoadS</i> : Simulierter, sechsbeiniger Laufroboter: (links) Laufroboter auf Treppe; (rechts) in der Umgebung können auch bewegliche Elemente integriert werden, wie z.B. eine Hänge- brücke. | 130 |
| 5.25 | Kommunikation zwischen <i>RoadS</i> und <i>MCA2</i> ist einfach und effizient. Quelle (modifiziert) [Sut12] | 131 |
| 5.26 | Parallele Dynamische Simulation: die realen Gelenkwinkel des Roboters <i>LAURON IVc</i> wer- den direkt von der Simulation verwendet. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2015] | 132 |
| 6.1 | Systematische Optimierung der Fähigkeiten und Eigenschaften von mehrbeinigen Laufro- botern. Quelle [Sch14] | 135 |
| 6.2 | Konzept der kinematischen Optimierung mit evolutionärem Algorithmus. Quelle [Bü15] . . . | 136 |
| 6.3 | Verlauf der kinematischen Optimierung eines sechsbeinigen, insektenartigen Systems mit ausgewählten Lösungen. | 137 |
| 6.4 | Ergebnisse der genetischen Optimierung: (links) insektenartige Kinematik, (mittig) reptili- enartige Kinematik, (rechts) säugetierartige Kinematik. Quelle [Bü15] | 137 |
| 6.5 | Auszug aus verhaltensbasierter Robotersteuerung: im linken Teil sind die drei Haltungskon- trollverhalten und im rechten Teil die lokalen Beinverhalten dargestellt. | 139 |
| 6.6 | Laufroboter <i>LAURON V</i> am Hang: (links) ohne Anpassung des PSI Winkels, (rechts) mit Anpassung an die Neigung und Entlastung der ALPHA-Gelenke. | 139 |
| 6.7 | Verlauf der Stabilität bei Experimenten an veränderlichem Hang | 140 |
| 6.8 | Laufroboter <i>LAURON V</i> an adaptiven Hang: (links) in der <i>Config 1</i> , (rechts) in der <i>Config 3</i> . | 140 |
| 6.9 | Konzept des Partikel-Schwarm-Optimierers: gezielter Einsatz der kinematischen Redundanz um die Stabilität beim Laufen zu verbessern. Mit x,y,z den Koordinaten der Bewegungstra- jektorie, den Gelenkwinkeln q , den Drehmomenten τ , der Fitnessfunktion $f(\tau)$ sowie den zu optimierenden DELTA Gelenkwinkeln δ . Quelle [Sch14] | 141 |
| 6.10 | Laufroboter <i>LAURON V</i> überwindet Hindernis bei Versuchen mit dem Partikel-Schwarm- Optimierer. Quelle [Sch14] | 142 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6.11 | Energieverbrauch E_V beim Überwinden des Hindernisses: (rote Kurve) vor der Optimierung, (grüne Kurve) schnelleres Überwinden des Hindernisses nach der Optimierung. Quelle [Sch14] | 142 |
| 6.12 | Stabilitätsreserve d_{min} beim Überwinden des Hindernisses: (rote Kurve) vor der Optimierung mit zweifachem Verlust der Stabilität, (grüne Kurve) Stabilitätsreserve von mindestens 40mm bleibt stets erhalten, Hindernis wird schneller überwunden. Quelle [Sch14] | 143 |
| 6.13 | Konzept der ROLL-Anstellwinkel Ψ der Beine gegenüber Zentralkörper: Winkel kann verändert werden um den Arbeitsraum zu optimieren. | 144 |
| 6.14 | Konzept der YAW-Anstellwinkel η der Beine gegenüber Zentralkörper: Winkel kann verändert werden um den Arbeitsraum zu optimieren. | 144 |
| 6.15 | Schrittweitenoptimierung bei 100mm Abstand zum Untergrund mit verschiedenen ROLL-Anstellwinkeln Ψ . (links) $\Psi = 30^\circ$, (mittig) $\Psi = 45^\circ$, (rechts) $\Psi = 60^\circ$. Farblich codiert ist der Wert der normierten Manipulierbarkeit w , schwarze Linien sind die evaluierten Schrittweiten, rote Linien sind die orthogonalen Tangenten zu den Schrittweiten durch den Ursprung. Quelle [Koc10] | 144 |
| 6.16 | Schrittweitenoptimierung bei 200mm Abstand zum Untergrund mit verschiedenen ROLL-Anstellwinkeln Ψ . (links) $\Psi = 30^\circ$, (mittig) $\Psi = 45^\circ$, (rechts) $\Psi = 60^\circ$. Farblich codiert ist der Wert der normierten Manipulierbarkeit w , schwarze Linien sind die evaluierten Schrittweiten, rote Linien sind die orthogonalen Tangenten zu den Schrittweiten durch den Ursprung. Quelle [Koc10] | 145 |
| 6.17 | Schrittweitenoptimierung bei 300mm Abstand zum Untergrund mit verschiedenen ROLL-Anstellwinkeln Ψ . (links) $\Psi = 30^\circ$, (mittig) $\Psi = 45^\circ$, (rechts) $\Psi = 60^\circ$. Farblich codiert ist der Wert der normierten Manipulierbarkeit w , schwarze Linien sind die evaluierten Schrittweiten, rote Linien sind die orthogonalen Tangenten zu den Schrittweiten durch den Ursprung. Quelle [Koc10] | 145 |
| 6.18 | Gait Diagramm des überlappenden, kontinuierlichen Tripod-Laufmusters. Quelle (modifiziert) [Pla15] | 146 |
| 6.19 | Laufgeschwindigkeit des Laufroboters <i>LAURON IVc</i> : (blaue Kurve) unveränderter Tripod mit Sicherheit, (rote Kurve) überlappender Tripod mit Sicherheit, (grüne Kurve) überlappender Tripod ohne Sicherheit. Quelle (modifiziert) [Hep11] | 147 |
| 6.20 | Darstellung der Laufgeschwindigkeit des Laufroboters <i>LAURON IVc</i> anhand der zurückgelegten Distanz: (rote Kurve) Experiment mit einfachen Potentiometers als Bodenkontaktinformation, (blaue Kurve) weiteres Experiment mit einfachen Potentiometers als Bodenkontaktinformation, (grüne Kurve) Experiment mit neuer Auswertung und Fusion der Potentiometer-Information und der Motorströme. Quelle (modifiziert) [Hep11] | 148 |
| 6.21 | Gegenüberstellung homogener und heterogener <i>Schrittweiten</i> : (links) <i>homogene Schrittweiten</i> - alle Beine verwenden die gleiche Schrittweite, (rechts) <i>heterogene Schrittweiten</i> - die vorderen und hinteren Beine verwenden deutlich kleinere Schrittweiten. | 148 |
| 6.22 | Konzept zur Online-Adaption von Bewegungstrajektorien für verschiedene Laufroboter. Quelle [Hel12] | 150 |
| 6.23 | Graphical User Interface (GUI) zur interaktive Anpassung der Bewegungstrajektorie. | 150 |
| 6.24 | Effektive Hebelarmmlängen beeinflussen den Energieverbrauch in den Gelenken. | 151 |

| | | |
|------|---|-----|
| 6.25 | Der Energieverbrauch eines Laufroboters hängt im Stand von der Kinematik ab: (links) schmaler Stand mit 780mm, (mittig) mittlerer Stand mit 880mm, (rechts) breiter Stand mit 980mm. | 152 |
| 6.26 | Die intelligente Regelung der Körperhöhe kann verwendet werden um den Energieverbrauch im Stand signifikant zu reduzieren: Experiment 1: die Körperhöhe wird nach ca. 5 Sekunden auf die Zielhöhe angehoben, was zu einem erhöhten Energieverbrauch führt, Experiment 2: die Körperhöhe wird ebenfalls nach 5 Sekunden angehoben, aber kurz darauf wieder leicht auf die gleiche Zielhöhe wie bei Experiment 1 abgesenkt, was zu einer deutlichen Minimierung des Energieverbrauchs führt. Quelle (modifiziert) [Hep11] | 152 |
| 6.27 | Veränderung der <i>Schrittweite</i> in <i>RoaDS</i> um $\pm 50mm$: (links) Normale Standbreite, (mittig) Breite Standbreite, (rechts) Schmale Standbreite. Quelle [Sut12] | 153 |
| 6.28 | Drehmomente des BETA-Gelenks beim Laufen mit verschiedenen Laufbreiten. Die Momente zeigen, dass der Energieverbrauch mit der Laufbreite zunimmt. Quelle (modifiziert) [Sut12] | 153 |
| 6.29 | Veränderung der BETA-Segmentlänge um 50mm bzw. 100mm. Quelle [Sut12] | 154 |
| 6.30 | Drehmomente des GAMMA-Gelenks beim Laufen mit veränderter Kinematik (neue Längen des Beta-Segments +50mm und +100mm). Quelle (modifiziert) [Sut12] | 154 |
| 6.31 | <i>Specific Resistance</i> in Abhängigkeit von der Laufgeschwindigkeit: die Laufgeschwindigkeit wurde über die <i>Schrittweite</i> langsam erhöht. Die verschiedenen Kurven zeigen den Einfluss der <i>Zykluszeit</i> T auf die <i>Specific Resistance</i> . Eine kürzere <i>Zykluszeit</i> ist bei allen Geschwindigkeiten von Vorteil. Quelle [Hep11] | 155 |
| 6.32 | <i>Specific Resistance</i> in Abhängigkeit von der Laufgeschwindigkeit: die Laufgeschwindigkeit wurde wieder über die <i>Schrittweite</i> erhöht. Die verschiedenen Kurven zeigen hier den Einfluss des Laufmusters auf die <i>Specific Resistance</i> . Das Tripod-Laufmuster (Beta = 0,5) ist nicht das effizienteste Laufmuster bei niedrigen Geschwindigkeiten. Quelle [Hep11] | 156 |
| 6.33 | Anpassung der Schwing- und Stemmtrajektorien durch Neigung zum Körper: (links) positive Neigungswinkel, (rechts) negative Neigungswinkel. | 157 |
| 6.34 | Geschwindigkeit und Leistungsaufnahme bei Neigung der Beintrajektorien. Quelle (modifiziert) [Hub15] | 157 |
| 6.35 | Geneigte der Schwing- und Stemmtrajektorien mit zusätzlicher, parabelförmiger Schwingtrajektorie: (links) positive Neigungswinkel, (rechts) negative Neigungswinkel. | 158 |
| 6.36 | Geschwindigkeit und Leistungsaufnahme bei Neigung der Beintrajektorien mit zusätzlich veränderter Schwingtrajektorie. Quelle (modifiziert) [Hub15] | 158 |
| 6.37 | Drehmomente beim Neigen des Roboters entlang der PITCH Achse: (links) vor der Optimierung treten hohe ALPHA-Momente auf, (rechts) der PSO-Optimierer kann die ALPHA-Momente auf ein Minimum reduzieren. Quelle [Sch14] | 159 |
| 6.38 | Energie des Roboters beim Neigen entlang der PITCH Achse: (blau) Energieverbrauch der ALPHA-Gelenke beim Neigen vor der Optimierung, (rot) Gesamtenergieverbrauch vor der Optimierung, (lila) Energieverbrauch der ALPHA-Gelenke nach der PSO-Optimierung, (grün) Gesamtenergieverbrauch nach der PSO-Optimierung. Quelle [Sch14] | 160 |
| 6.39 | Energieverbrauch beim Laufen: (links) Verläufe der DELTA-Gelenkwinkel beim optimierten Laufen, (rechts) Energieverbrauch beim Laufen. Quelle [Sch14] | 160 |

| | | |
|------|---|-----|
| 7.1 | Evaluation der Laufgeschwindigkeit mittels 2D-Linienscanners. Quelle [Hep11] | 165 |
| 7.2 | Experiment zur Evaluation des Energieverbrauchs: Messung des Gesamtstroms über interne, kalibrierte Motorstrommessung. Nach 30 Sekunden wird eine Last von 15 kg auf <i>LAURON IVc</i> abgelegt. | 166 |
| 7.3 | Experiment zur Evaluation des Energieverbrauchs: Vergleich des internen Gesamtstroms mit externer Referenzmessung | 167 |
| 7.4 | Maximal mögliche <i>Schrittweite</i> in Abhängigkeit des YAW-Anstellwinkels η sowie dem ROLL-Anstellwinkel Ψ : (links) Laufhöhe von 100mm, rechts Laufhöhe 200mm. | 167 |
| 7.5 | Finale ROLL- und YAW-Anstellwinkel von <i>LAURON V</i> nach Arbeitsraumanalysen. | 168 |
| 7.6 | Laufroboter <i>LAURON V</i> greift mit dem Vorderbeinen ein großes Batterieobjekt im Rahmen des nationalen DLR SpaceBot Camp 2015. Quelle [65] | 169 |
| 7.7 | Virtuelle Kraftmessung zur Evaluation der <i>RoadS</i> -Simulationsumgebung: Messwerte stimmen gut mit den realen Eigenschaften des Roboters überein. Quelle (modifiziert) [Sut12] | 170 |
| 7.8 | Parallele Messung des virtuellen Drehmoments und der realen Motorströme für das BETA-Gelenk an Bein L3: Kurven zeigen große Übereinstimmungen, aber auch deutliche Unterschiede. Quelle (modifiziert) [Sut12] | 171 |
| 7.9 | Stromverbrauch der ALPHA-Gelenke sowie des Gesamtsystems während des Stabilitätsexperiments mit Haltungskontrollverhalten | 172 |
| 7.10 | <i>Specific Resistance</i> des Laufroboters <i>LAURON IVc</i> vor (rot) und nach (grün) der Optimierung der Energieeffizienz. Quelle [Hep11] | 173 |
| 7.11 | Konzept bzw. Systemarchitektur der Augmented Reality Anwendung, die zur Evaluation der <i>RoadS</i> -Simulationsumgebung entwickelt wurde. Quelle (modifiziert) [Sut12] | 174 |
| 7.12 | Die Augmented Reality Darstellung auf dem Smartphone erlaubt es den virtuellen, simulierten Roboter direkt mit dem realen System zu vergleichen. Quelle [Sut12] | 174 |
| 7.13 | Evaluation anhand eines virtuellen Wettrennens zwischen der dynamischen Simulation und dem realen Roboter. Quelle [Sut12] | 175 |
| 7.14 | Evaluation der interaktiven Bewegungstrajektorien mit dem Laufroboter <i>LAURON IVc</i> | 175 |
| 8.1 | Vision: sechsbeiniger Laufroboter <i>LAURON</i> als Serviceroboter im Haushalt. | 183 |
| A.1 | Mutmaßliche Rekonstruktion des hölzernen Löwen, der für den Besuch des französischen Königs im Jahr 1515 von <i>Leonardo da Vinci</i> entwickelt wurde. Quelle [210] | 185 |
| A.2 | Bewegungsstudien von Eadweard Muybridge zur Erforschung der mehrbeinigen Lokomotion. Quelle [152] | 186 |
| A.3 | Patente mechanischer Laufmaschinen: (links) <i>Mechanical Horse</i> - ein mechanisches Pferd entwickelt von <i>L.A. Rygg</i> im Jahr 1893. Quelle [185], (rechts) Patentanmeldung eines Schreitwagens durch <i>Freiherr von Bechtolsheim</i> im Jahr 1913. Quelle [219] | 187 |
| A.4 | (links) <i>GE Walking Truck</i> von <i>Mosher</i> aus dem Jahr 1968. Quelle [175], (rechts) <i>Phoney Pony</i> von <i>McGhee und Frank</i> aus dem Jahr 1966. Quelle [157] | 189 |
| A.5 | (links) <i>KUMO-I</i> : Japanischer Leichtbau-Laufroboter aus dem Jahr 1976. Quelle [95], (rechts) Bei <i>Masha</i> handelt es sich um einen der ersten Laufroboter, der von einem Vorgänger des Computers gesteuert wurde. Quelle [146] | 189 |

- A.6 (links) *Six-Legged Walking Machine* von *Sutherland* aus dem Jahr 1983. Quelle [209], (rechts) *Adaptive Suspension Vehicle*: großer, hydraulischer Laufroboter mit guter Geländegängigkeit. Quelle [173] 190
- A.7 (links): Der achtbeinige Laufroboter *DANTE II* lief im Jahr 1994 erfolgreich in einen Vulkankrater hinab, Quelle [157], (rechts) Der sechsbeinige *Genghis* wurde vor allem eingesetzt um verhaltensbasierte Software zu evaluieren, Quelle [119] 191
- A.8 Erste Generation des Laufroboters *LAURON* des FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, aus dem Jahr 1994. 191
- A.9 (links) Der sechsbeinige Laufroboter *SpaceClimber* wurde speziell für planetare Explorationsmissionen entwickelt. Quelle [18]; (rechts) *CREX* ist die Weiterentwicklung des *SpaceClimber*, der in einem Roboterteam für Weltraummissionen eingesetzt werden soll. Quelle [180] 193
- A.10 (links) Sechsbeiniger Laufroboter *AMOS-WD06* wird mittels *Chaos Control* gesteuert. Quelle [142]; (rechts) *RHex* ist durch die spezielle Kinematik extrem geländegängig und robust. Quelle [225] 194
- A.11 (links) Die Kinematik von *SIL06* wurde optimiert um eine gleichförmige Belastung der Beine sicherzustellen. Quelle [60]; (rechts) Die *LEMURII* Robotersysteme sind Lauf- und Kletterroboter und wurden für die planetare Erforschung von Kraterwänden entwickelt. Quelle [153] 195
- A.12 (links) Sechsbeiniger Laufroboter *Katharina* kann dank der kraftbasierten Regelung als mobile Werkzeugplattform eingesetzt werden. Quelle [190]; (rechts) Der Laufroboter *BigDog* war der erste mehrbeinige Laufroboter von Boston Dynamics und beeindruckte bereits zu Beginn mit seiner stabilen, robusten Lokomotion. Quelle [36] 196
- A.13 (links) Boston Dynamics setzt neue Maßstäbe mit ihren mehrbeinigen Laufrobotern. Das Bild zeigt den neusten, voll elektrischen Laufroboter *SpotMini*. Quelle [39]; (rechts) Der agile, robuste vierbeinige Laufroboter *ANYmal* nutzt modulare Serial-Elastic-Actuators um dynamisches Laufen in realen Anwendungen zu ermöglichen. Quelle [104] 197
- A.14 (links) Modularer, rekonfigurierbarer Laufroboter *Snake Monster*. Quelle [215]; (rechts) Der kleine *DLR-Klabber* wurde aus sechs Finger der DLR-Hand II aufgebaut. Quelle [86] . . . 199
- A.15 (links) *TITAN XIII* - Dynamisch laufender, vierbeiniger Roboter aus der *TITAN* Laufroboterfamilie. Quelle [126]; (rechts) Sehr schneller, leichter und kleiner Laufroboter *DASH*. Quelle [31] 200
- A.16 (links) 3D-gedruckter OpenSource Laufroboter *Hexabot*. Quelle [70]; (rechts) Online rekonfigurierbarer Laufroboter *Snapbot*. Quelle [123] 201
- A.17 (links) Biologisch motivierte Laufroboter *Pleurobot*. Quelle [118]; (rechts) *MIT Cheetah 2* Laufroboter nach dem Vorbild eines Gepards. Quelle [71] 202
- A.18 (links) Der *RoboSimian* des JPL ist mit 28 aktiven Freiheitsgraden einer der komplexesten eingesetzten Laufroboter überhaupt. Quelle [92]; (rechts) vierbeiniger, hydraulischer Laufroboter *HyQ* mit externem Kompressor. Quelle [199] 204
- A.19 (links) Der sechsbeinige Laufroboter *Messor II* wurde als flexible Sensorplattform entwickelt. Quelle [17]; (rechts) Der sechsbeinige, biologisch inspirierte Laufroboter *HECTOR* wurde der indischen Stabheuschrecke nachempfunden. Quelle [167] 205

| | | |
|------|--|-----|
| A.20 | Typische Anwendungsfelder für mehrbeinige Laufroboter. Bildquellen [171] | 207 |
| A.21 | Boston Dynamics <i>LS3</i> wurde als robotischer Lastesel entwickelt. Quelle [39] | 207 |
| A.22 | <i>LAURON V</i> wurde bei der Katastrophenschutzübung TARANIS mit zahlreichen Sensoren ausgestattet um bei der Suche nach verletzten Personen zu unterstützen. | 208 |
| A.23 | Der <i>Plustech Harvester</i> wurde entwickelt um Wald- und Forstarbeiten in schwierigem Ge- lände durchzuführen und gleichzeitig den Waldboden zu schonen. Quelle [44] | 209 |
| A.24 | Fortschrittlicher, sechsbeiniger Unterwasser-Laufroboter <i>Crabster CR200</i> aus Süd-Korea. Quelle [114] | 210 |
| A.25 | <i>LAURON V</i> beim DLR SpaceBot Camp 2015 läuft einen nachgebildet Kratenhang hinab. . . | 210 |
| A.26 | Der sechsbeinige Laufroboter <i>COMET II</i> wurde in Japan entwickelt um Landminen zu su- chen. Quelle [195] | 211 |
| A.27 | Entertainment Laufroboter: (links) <i>Hexabugs</i> der Firma Innovation First International, Inc.; (mittig) <i>Kamigami</i> eine Variante des <i>DASH</i> Roboters; (rechts) neuste Generation des be- rühmten SONY <i>aibo</i> , [122]. | 212 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|-----|
| 3.1 | Klassen mehrbeiniger Laufroboter mit Beispielen aus denen im Anhang A detailliert vorgestellten Laufrobotern. | 35 |
| 5.1 | Stapel-Experiment: Anzahl der Würfel, die stabil auf einem Turm stehen bleiben (siehe links in Abb. 5.16). Es wurden maximal 30 Würfel zu einem Turm aufgebaut. Simulation wurde jeweils mit normaler Simulationsgüte und höher, präziser Simulationsgüte durchgeführt. Quelle (modifiziert) [Sut12] | 125 |
| 5.2 | Vergleich der drei Physik-Engines in zahlreichen virtuellen Experimenten: alle drei Physik-Engines zeigen Schwächen. Insgesamt konnte <i>Bullet</i> am ehesten überzeugen. Bewertung: –:= schwach, ◦:= normal, +:= gut. Quelle (modifiziert) [Sut12] | 128 |
| 6.1 | Ergebnisse der genetischen Optimierung: je kleiner die Masse und Haltemomente desto besser, je größer die Stabilität und <i>Schrittweite</i> desto besser. Werte nur für relativen Vergleich, entsprechen keiner SI-Einheit. Quelle (modifiziert) [Bü15] | 138 |
| 6.2 | Konfigurationen der vier Stabilitätsversuche am Hang. | 140 |
| 6.3 | Übersicht Schrittweitenvergleich in [mm] bei verschiedenen ROLL-Anstellwinkeln Ψ | 145 |
| 6.4 | Vergleich der ROLL-Anstellwinkel für <i>LAURON V</i> und die indische Stabheuschrecke [52] | 145 |
| 6.5 | Experiment mit heterogenen <i>Schrittweiten</i> zeigt, dass gezielte Verspannungen einen positiven Effekt auf die Laufgeschwindigkeit haben können. Quelle (modifiziert) [Roennau et al., 2011a] | 149 |
| 6.6 | Energieverbrauch des Roboters <i>LAURON IVc</i> in Abhängigkeit von der Standbreite | 151 |
| 6.7 | Energieeffizienz verändert sich mit dem Neigungswinkel der Beintrajektorien. Quelle (modifiziert) [Hub15] | 157 |
| 6.8 | Energieeffizienz verändert sich mit dem Neigungswinkel der Beintrajektorien auch bei einer parabelförmigen Schwingbewegung. Quelle (modifiziert) [Hub15] | 159 |
| 7.1 | Vergleich der ROLL- und YAW-Anstellwinkel für <i>LAURON V</i> und der indischen Stabheuschrecke [52] | 168 |
| A.1 | Zeitstrahl: Historische Entwicklung mehrbeiniger Laufroboter bis 1950 | 188 |
| A.2 | Zeitstrahl: Historische Entwicklung mehrbeiniger Laufroboter ab 1950 | 192 |

Literaturverzeichnis

- [1] E. Ackerman. Boston dynamics' spotmini is all electric, agile, and has a capable face-arm. new york. *IEEE Spectrum*, pages 10–17, 2016.
- [2] J. Akizono, T. Tanaka, K. Nakagawa, T. Tsuji, and M. Iwasaki. Seabottom roughness measurement by aquatic walking robot. In *OCEANS'97. MTS/IEEE Conference Proceedings*, volume 2, pages 1395–1398. IEEE, 1997.
- [3] J. Albiez, B. Giesler, J. Lellmann, J. M. Zöllner, and R. Dillmann. Virtual immersion for telecontrolling a hexapod robot. In *Climbing and Walking Robots*, pages 1087–1094. Springer, 2006.
- [4] R. Alexander. Mcn.(1977). terrestrial locomotion. *Mechanics and energetics of animal locomotion*, pages 168–203, 1980.
- [5] R. M. Alexander. Estimates of speeds of dinosaurs. *Nature*, 261(5556):129, 1976.
- [6] R. M. Alexander. *Locomotion of animals*. Blackie, 1982.
- [7] R. M. Alexander. The gaits of bipedal and quadrupedal animals. *The International Journal of Robotics Research*, 3(2):49–59, 1984.
- [8] R. M. Alexander. *Principles of animal locomotion*. Princeton University Press, 2003.
- [9] R. M. Alexander. Models and the scaling of energy costs for locomotion. *Journal of Experimental Biology*, 208(9):1645–1652, 2005.
- [10] T. J. Allen, R. D. Quinn, R. J. Bachmann, and R. E. Ritzmann. Abstracted biological principles applied with reduced actuation improve mobility of legged vehicles. In *Intelligent Robots and Systems, 2003.(IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 2, pages 1370–1375. IEEE, 2003.
- [11] C. Angle. *Genghis, a six legged autonomous walking robot*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1989.
- [12] C. M. Angle and R. A. Brooks. Small planetary rovers. In *Intelligent Robots and Systems' 90.'Towards a New Frontier of Applications', Proceedings. IROS'90. IEEE International Workshop on*, pages 383–388. IEEE, 1990.
- [13] ArcBotics. Hexy the hexapod kit. Webseite: Hexy the Hexapod kit, letzter Zugriff: 12.05.2018.
- [14] T. Asfour, J. Schill, H. Peters, C. Klas, J. Bücker, C. Sander, S. Schulz, A. Kargov, T. Werner, and V. Bartenbach. Armar-4: A 63 dof torque controlled humanoid robot. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2013 13th IEEE-RAS International Conference on*, pages 390–396. IEEE, 2013.

- [15] A. Ayali, A. Borgmann, A. Bueschges, E. Couzin-Fuchs, S. Daun-Gruhn, and P. Holmes. The comparative investigation of the stick insect and cockroach models in the study of insect locomotion. *Current Opinion in Insect Science*, 12:1–10, 2015.
- [16] J. E. Bares and D. S. Wettergreen. Dante ii: Technical description, results, and lessons learned. *The International Journal of Robotics Research*, 18(7):621–649, 1999.
- [17] S. Bartoszyk, P. Kasprzak, and D. Belter. Terrain-aware motion planning for a walking robot. In *2017 11th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo)*, pages 29–34. IEEE, 2017.
- [18] S. Bartsch. Development, control, and empirical evaluation of the six-legged robot spaceclimber designed for extraterrestrial crater exploration. *KI-Künstliche Intelligenz*, 28(2):127–131, 2014.
- [19] S. Bartsch, T. Birnschein, F. Cordes, D. Kühn, P. Kampmann, J. Hilljegerdes, S. Planthaber, M. Römmermann, and F. Kirchner. Spaceclimber: Development of a six-legged climbing robot for space exploration. In *Robotics (ISR), 2010 41st international symposium on and 2010 6th German conference on robotics (ROBOTIK)*, pages 1–8. VDE, 2010.
- [20] S. Bartsch, T. Birnschein, M. Römmermann, J. Hilljegerdes, D. Kühn, and F. Kirchner. Development of the six-legged walking and climbing robot spaceclimber. *Journal of Field Robotics*, 29(3):506–532, 2012.
- [21] R. D. Beer, R. D. Quinn, H. J. Chiel, and R. E. Ritzmann. Biologically inspired approaches to robotics: What can we learn from insects? *Communications of the ACM*, 40(3):30–38, 1997.
- [22] D. Belter and P. Skrzypczyński. Rough terrain mapping and classification for foothold selection in a walking robot. *Journal of Field Robotics*, 28(4):497–528, 2011.
- [23] D. Belter and P. Skrzypczyński. Posture optimization strategy for a statically stable robot traversing rough terrain. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2204–2209. IEEE, 2012.
- [24] D. Belter and K. Walas. A compact walking robot–flexible research and development platform. In *Recent Advances in Automation, Robotics and Measuring Techniques*, pages 343–352. Springer, 2014.
- [25] K. Berns, S. Cordes, and W. Ilg. Adaptive, neural control architecture for the walking machine lauron. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94)*, volume 2, pages 1172–1177. IEEE, 1994.
- [26] K. Berns and M. Fiegert. Laufmaschinen: von der fiktion zur realität. *Technische Rundschau*, 46:42–51, 1991.
- [27] P. A. Bhounsule, J. Cortell, A. Grewal, B. Hendriksen, J. D. Karssen, C. Paul, and A. Ruina. Low-bandwidth reflex-based control for lower power walking: 65 km on a single battery charge. *The International Journal of Robotics Research*, 33(10):1305–1321, 2014.
- [28] P. A. Bhounsule, J. Cortell, and A. Ruina. Design and control of ranger: an energy-efficient, dynamic walking robot. In *Adaptive Mobile Robotics*, pages 441–448. World Scientific, 2012.

-
- [29] C. M. Biancardi and A. E. Minetti. Biomechanical determinants of transverse and rotary gallop in cursorial mammals. *Journal of Experimental Biology*, pages jeb-073031, 2012.
- [30] J. Billen, M. S. Al-Khalifa, and R. R. Silva. Pretarsus structure in relation to climbing ability in the ants *brachyponera sennaarensis* and *daceton armigerum*. *Saudi journal of biological sciences*, 24(4):830–836, 2017.
- [31] P. Birkmeyer, K. Peterson, and R. S. Fearing. Dash: A dynamic 16g hexapedal robot. In *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2683–2689. IEEE, 2009.
- [32] B. Bläsing and H. Cruse. Mechanisms of stick insect locomotion in a gap-crossing paradigm. *Journal of Comparative Physiology A*, 190(3):173–183, 2004.
- [33] R. Blickhan and R. Full. Similarity in multilegged locomotion: bouncing like a monopode. *Journal of Comparative Physiology A*, 173(5):509–517, 1993.
- [34] R. Blickhan and R. J. Full. Mechanical work in terrestrial locomotion. *Biomechanics: Structures and Systems*, pages 75–96, 1992.
- [35] R. Blickhan, A. Seyfarth, H. Geyer, S. Grimmer, H. Wagner, and M. Günther. Intelligence by mechanics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1850):199–220, 2006.
- [36] Boston Dynamics. BIGDOG - The first advanced rough-terrain robot. Webseite: Bosten Dynamics SpotMini Roboter, letzter Zugriff: 03.05.2019.
- [37] Boston Dynamics. LS3 - Legged Squad Support. Webseite: Bosten Dynamics LS3 Robot, letzter Zugriff: 09.05.2018.
- [38] Boston Dynamics. SPOT - Takes a kicking and keeps on ticking. Webseite: Bosten Dynamics Spot Robot, letzter Zugriff: 09.05.2018.
- [39] Boston Dynamics. SPOTMINI - Good things come in small packages. Webseite: Bosten Dynamics SpotMini Roboter, letzter Zugriff: 12.05.2018.
- [40] R. A. Brooks. A robot that walks; emergent behaviors from a carefully evolved network. *Neural computation*, 1(2):253–262, 1989.
- [41] M. Buehler. Dynamic locomotion with one, four and six-legged robots. *Journal of the Robotics Society of Japan*, 20(3):237–242, 2002.
- [42] Bullet. Opensource Physics Engine in ver. 2.79. more details at: Bullet Website, 2013.
- [43] M. Calisti. Soft robotics in underwater legged locomotion: From octopus-inspired solutions to running robots. In *Soft Robotics: Trends, Applications and Challenges*, pages 31–36. Springer, 2017.
- [44] G. Carbone and M. Ceccarelli. Legged robotic systems. In *Cutting Edge Robotics*. InTech, 2005.

- [45] S. Carpin, M. Lewis, J. Wang, S. Balakirsky, and C. Scrapper. Usarsim: a robot simulator for research and education. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, pages 1400–1405. IEEE, 2007.
- [46] B. Carse, B. Meadows, R. Bowers, and P. Rowe. Affordable clinical gait analysis: An assessment of the marker tracking accuracy of a new low-cost optical 3d motion analysis system. *Physiotherapy*, 99(4):347–351, 2013.
- [47] G. Cavagna and M. Kaneko. Mechanical work and efficiency in level walking and running. *The Journal of physiology*, 268(2):467–481, 1977.
- [48] E. Chang-Siu, T. Libby, M. Tomizuka, and R. J. Full. A lizard-inspired active tail enables rapid maneuvers and dynamic stabilization in a terrestrial robot. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1887–1894. IEEE, 2011.
- [49] S. H. Collins and A. Ruina. A bipedal walking robot with efficient and human-like gait. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pages 1983–1988. IEEE, 2005.
- [50] S. Coros, A. Karpathy, B. Jones, L. Reveret, and M. Van De Panne. Locomotion skills for simulated quadrupeds. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 30, page 59. ACM, 2011.
- [51] A. Crespi, K. Karakasiliotis, A. Guignard, and A. J. Ijspeert. Salamandra robotica ii: an amphibious robot to study salamander-like swimming and walking gaits. *IEEE Transactions on Robotics*, 29(2):308–320, 2013.
- [52] H. Cruse. The function of the legs in the free walking stick insect, *carausius morosus*. *Journal of Comparative Physiology*, 112(2):235–262, 1976.
- [53] H. Cruse and C. Bartling. Movement of joint angles in the legs of a walking insect, *carausius morosus*. *Journal of Insect Physiology*, 41(9):761–771, 1995.
- [54] H. Cruse, J. Dean, U. Muller, and J. Schmitz. The stick insect as a walking robot. In *Fifth International Conference on Advanced Robotics' Robots in Unstructured Environments*, pages 936–940. IEEE, 1991.
- [55] H. Cruse, J. Dean, U. Muller, and J. Schmitz. The stick insect as a walking robot. In *Advanced Robotics, 1991. 'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference on*, pages 936–940. IEEE, 1991.
- [56] H. Cruse, V. Dürr, M. Schilling, and J. Schmitz. Principles of insect locomotion. In *Spatial temporal patterns for action-oriented perception in roving robots*, pages 43–96. Springer, 2009.
- [57] H. Cruse, T. Kindermann, M. Schumm, J. Dean, and J. Schmitz. Walknet—a biologically inspired network to control six-legged walking. *Neural networks*, 11(7-8):1435–1447, 1998.
- [58] C. Darwin. *Über die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl*, volume 2. Schweizerbart, 1899.

- [59] P. G. de Santos, J. Estremera, and E. Garcia. Optimizing leg distribution around the body in walking robots. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pages 3207–3212. IEEE, 2005.
- [60] P. G. De Santos, E. Garcia, and J. Estremera. Improving walking-robot performances by optimizing leg distribution. *Autonomous Robots*, 23(4):247–258, 2007.
- [61] P. G. de Santos, E. Garcia, R. Ponticelli, and M. Armada. Minimizing energy consumption in hexapod robots. *Advanced Robotics*, 23(6):681–704, 2009.
- [62] J. de Vaucanson. *Le Mécanisme Du Fluteur Automate: Avec La description d'un Canard Artificiel, mangeant, buvant, digérant & se vidant... imitant en diverses manières un Canard vivant...; Et aussi Celle d'une autre figure... jouant du Tambourin & de la Flute, suivant la rélation, qu'il en a donnée depuis son Mémoire écrit*. Guerin, 1738 (Original in französischer Sprache).
- [63] F. Delcomyn. The locomotion of the cockroach *periplaneta americana*. *Journal of Experimental Biology*, 54(2):443–452, 1971.
- [64] X. Ding, Z. Wang, A. Rovetta, and J. Zhu. Locomotion analysis of hexapod robot. In *Climbing and walking robots*. IntechOpen, 2010.
- [65] DLR Raumfahrtmanagement. LAUROPE Forschungszentrum Informatik Karlsruhe (SpaceBot Camp 2015). Webseite: Youtube Video des DLR, letzter Zugriff: 06.11.2018.
- [66] R. Donald. *The book of ingenious devices:(Kitab al-Hiyal) by the banu (sons of) Musa bin Shakir*. D. Reidel, 1979.
- [67] J. M. Donelan, R. Kram, and A. D. Kuo. Mechanical work for step-to-step transitions is a major determinant of the metabolic cost of human walking. *Journal of Experimental Biology*, 205(23):3717–3727, 2002.
- [68] E. Donovan and T. Gleeson. Scaling the duration of activity relative to body mass results in similar locomotor performance and metabolic costs in lizards. *Journal of Experimental Biology*, 211(20):3258–3265, 2008.
- [69] W. J. Duncan. *Physical similarity and dimensional analysis: an elementary treatise*. Arnold, 1953.
- [70] J. Dupeyroux, G. Passault, F. Ruffier, S. Viollet, and J. Serres. Hexabot: a small 3d-printed six-legged walking robot designed for desert ant-like navigation tasks. In *IFAC World Congress 2017*, 2017.
- [71] engadget.com. Roboter-Gepard von der Leine gelassen, springt elektrisch über die Wiese. Webseite: engadget.com MIT Cheetah Video, letzter Zugriff: 03.05.2019.
- [72] C. T. Farley, J. Glasheen, and T. A. McMahon. Running springs: speed and animal size. *Journal of experimental Biology*, 185(1):71–86, 1993.
- [73] Freenove. Quadruped robot kit. Webseite: Small Hexapod kit from freenove, letzter Zugriff: 12.05.2018.

- [74] M. Frik, M. Guddat, D. Losch, and M. Karatas. Terrain adaptive control of the walking machine tarry ii. In *Proc. European Mechanics Colloquium, Euromech*, volume 375, pages 108–115, 1998.
- [75] R. J. Full and M. S. Tu. Mechanics of six-legged runners. *Journal of experimental biology*, 148(1):129–146, 1990.
- [76] R. J. Full and M. S. Tu. Mechanics of a rapid running insect: two-, four- and six-legged locomotion. *Journal of Experimental Biology*, 156(1):215–231, 1991.
- [77] Y. Gao, V. Barasuol, D. G. Caldwell, and C. Semini. Study on the morphological parameters of quadruped robot designs considering ditch traversability. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pages 283–288. IEEE, 2016.
- [78] E. Garcia and P. G. De Santos. An improved energy stability margin for walking machines subject to dynamic effects. *Robotica*, 23(1):13–20, 2005.
- [79] E. Garcia, J. Estremera, and P. G. De Santos. A comparative study of stability margins for walking machines. *Robotica*, 20(6):595–606, 2002.
- [80] B. Gaßmann. *Modellbasierte, sensorgestützte navigation von laufmaschinen im gelände*. Univ.-Verlag Karlsruhe, 2007.
- [81] S. Gatesy and A. Biewener. Bipedal locomotion: effects of speed, size and limb posture in birds and humans. *Journal of Zoology*, 224(1):127–147, 1991.
- [82] A. Ghasempour and N. Sepehri. A measure of machine stability for moving base manipulators. In *Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on*, volume 3, pages 2249–2254. IEEE, 1995.
- [83] gizmodo.com. This is why you should take lithium-ion battery fires very, very seriously. Webseite: RoboSimian Battery Fire, letzter Zugriff: 16.08.2018.
- [84] M. Golubitsky, I. Stewart, P.-L. Buono, and J. Collins. Symmetry in locomotor central pattern generators and animal gaits. *Nature*, 401(6754):693, 1999.
- [85] D.-I. M. Görner. *Locomotion and Pose Estimation in Compliant, Torque-Controlled Hexapedal Robots*. PhD thesis, Technischen Universität Ilmenau, 2017.
- [86] M. Gerner, T. Wimbock, A. Baumann, M. Fuchs, T. Bahls, M. Grebenstein, C. Borst, J. Butterfass, and G. Hirzinger. The dlr-crawler: A testbed for actively compliant hexapod walking based on the fingers of dlr-hand ii. In *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1525–1531. IEEE, 2008.
- [87] M. Görner, T. Wimböck, and G. Hirzinger. The dlr crawler: evaluation of gaits and control of an actively compliant six-legged walking robot. *Industrial Robot: An International Journal*, 36(4):344–351, 2009.
- [88] R. Goulet. *Dictionnaire des philosophes antiques (2): Babélyca d’Argos à Dyscolius*. FeniXX, 1993 (Original in französischer Sprache).

- [89] M. Gruhn, L. Zehl, and A. Büschges. Straight walking and turning on a slippery surface. *Journal of Experimental Biology*, 212(2):194–209, 2009.
- [90] V. Gurfinkel, E. Gurfinkel, A. Y. Shneider, E. Devjanin, A. Lensky, and L. Shtilman. Walking robot with supervisory control. *Mechanism and Machine Theory*, 16(1):31–36, 1981.
- [91] F. Hardarson. *Locomotion for difficult terrain*. Citeseer, 1998.
- [92] P. Hebert, M. Bajracharya, J. Ma, N. Hudson, A. Aydemir, J. Reid, C. Bergh, J. Borders, M. Frost, M. Hagman, et al. Mobile manipulation and mobility as manipulation—design and algorithms of robosimian. *Journal of Field Robotics*, 32(2):255–274, 2015.
- [93] Hexbug Scarab. The scarab is a high-speed, mechanical, beetle-like robotic bug that skitters around on six angled legs. Webseite: <https://www.hexbug.com/hexbug-scarab.html>, letzter Zugriff: 06.09.2018.
- [94] S. Hirose. Super mechano-system: New perspective for versatile robotic system. In *Experimental Robotics VII*, pages 249–258. Springer, 2001.
- [95] S. Hirose, Y. Fukuda, K. Yoneda, A. Nagakubo, H. Tsukagoshi, K. Arikawa, G. Endo, T. Doi, and R. Hodoshima. Quadruped walking robots at tokyo institute of technology. *IEEE robotics & automation magazine*, 16(2), 2009.
- [96] S. Hirose, H. Tsukagoshi, and K. Yoneda. Normalized energy stability margin and its contour of walking vehicles on rough terrain. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 181–186. IEEE, 2001.
- [97] S. Hirose, K. Yoneda, and H. Tsukagoshi. Titan vii: Quadruped walking and manipulating robot on a steep slope. In *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 494–500. IEEE, 1997.
- [98] R. Hodoshima, Y. Fukumura, H. Amano, and S. Hirose. Development of track-changeable quadruped walking robot titan x-design of leg driving mechanism and basic experiment. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 3340–3345. IEEE, 2010.
- [99] P. Holmes, R. J. Full, D. Koditschek, and J. Guckenheimer. The dynamics of legged locomotion: Models, analyses, and challenges. *SIAM review*, 48(2):207–304, 2006.
- [100] D. F. Hoyt and C. R. Taylor. Gait and the energetics of locomotion in horses. *Nature*, 292(5820):239, 1981.
- [101] T. Y. Hubel, J. P. Myatt, N. R. Jordan, O. P. Dewhirst, J. W. McNutt, and A. M. Wilson. Energy cost and return for hunting in african wild dogs and cheetahs. *Nature communications*, 7:11034, 2016.
- [102] M. Hutter, C. Gehring, M. Bloesch, M. A. Hoepflinger, C. D. Remy, and R. Siegwart. Starleth: A compliant quadrupedal robot for fast, efficient, and versatile locomotion. In *Adaptive Mobile Robotics*, pages 483–490. World Scientific, 2012.
- [103] M. Hutter, C. Gehring, M. A. Höpflinger, M. Blösch, and R. Siegwart. Toward combining speed, efficiency, versatility, and robustness in an autonomous quadruped. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(6):1427–1440, 2014.

- [104] M. Hutter, C. Gehring, D. Jud, A. Lauber, C. D. Bellicoso, V. Tsounis, J. Hwangbo, K. Bodie, P. Fankhauser, M. Bloesch, et al. Anymal-a highly mobile and dynamic quadrupedal robot. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 38–44. IEEE, 2016.
- [105] J. Hwangbo, C. D. Bellicoso, P. Fankhauser, and M. Hutter. Probabilistic foot contact estimation by fusing information from dynamics and differential/forward kinematics. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 3872–3878. IEEE, 2016.
- [106] J. Hwangbo, J. Lee, A. Dosovitskiy, D. Bellicoso, V. Tsounis, V. Koltun, and M. Hutter. Learning agile and dynamic motor skills for legged robots. *Science Robotics*, 4(26), 2019.
- [107] A. S. Ibañez and J. P. Figueras. Vuforia v1. 5 sdk: Analysis and evaluation of capabilities. *Master in Science in Telecommunication Engineering & Management*, 2013.
- [108] F. Iida, G. Gómez, and R. Pfeifer. Exploiting body dynamics for controlling a running quadruped robot. In *ICAR'05. Proceedings., 12th International Conference on Advanced Robotics, 2005.*, pages 229–235. IEEE, 2005.
- [109] A. J. Ijspeert, A. Crespi, D. Ryczko, and J.-M. Cabelguen. From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model. *science*, 315(5817):1416–1420, 2007.
- [110] W. Ilg and K. Berns. A learning architecture based on reinforcement learning for adaptive control of the walking machine lauron. *Robotics and Autonomous Systems*, 15(4):321–334, 1995.
- [111] Independent Digital News & Media. Pride of da vinci's genius walks again after 500 years. Webseite: Leonardo Da Vinci's Lion Robot, letzter Zugriff: 10.05.2018.
- [112] B. Jakimovski, B. Meyer, and E. Maehle. 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, Orlando, USA, 2009*.
- [113] A. M. Johnson and D. E. Koditschek. Robot parkour: the ground reaction complex & dynamic transitions. *Dynamic Walking*, 2013.
- [114] B.-H. Jun, H. Shim, B. Kim, J.-Y. Park, H. Baek, S. Yoo, and P.-M. Lee. Development of seabed walking robot cr200. In *OCEANS-Bergen, 2013 MTS/IEEE*, pages 1–5. IEEE, 2013.
- [115] S. Kalouche, D. Rollinson, and H. Choset. Modularity for maximum mobility and manipulation: Control of a reconfigurable legged robot with series-elastic actuators. In *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2015 IEEE International Symposium on*, pages 1–8. IEEE, 2015.
- [116] Kamigami Robots. KAMIGAMI - the robot that moves like a real animal. Webseite: <https://kamigamirobots.com>, letzter Zugriff: 06.09.2018.
- [117] K. Karakasiliotis, N. Schilling, J.-M. Cabelguen, and A. J. Ijspeert. Where are we in understanding salamander locomotion: biological and robotic perspectives on kinematics. *Biological cybernetics*, 107(5):529–544, 2013.

- [118] K. Karakasiliotis, R. Thandiackal, K. Melo, T. Horvat, N. Mahabadi, S. Tsitkov, J. Cabelguen, and A. Ijspeert. From cineradiography to biorobots: an approach for designing robots to emulate and study animal locomotion. *Journal of The Royal Society Interface*, 13(119):20151089, 2016.
- [119] T. Karakurt, A. Durdu, and N. Yilmaz. Design of six legged spider robot and evolving walking algorithms. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 5(2):96–100, 2015.
- [120] K. Kato and S. Hirose. Proposition of the humanitarian demining system by the quadruped walking robot-adaptability for various tasks using the foot-end-effector changing mechanism. In *Intelligent Robots and Systems, 2000.(IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 1, pages 769–774. IEEE, 2000.
- [121] B. Kennedy, A. Okon, H. Aghazarian, M. Badescu, X. Bao, Y. Bar-Cohen, Z. Chang, B. E. Dabiri, M. Garrett, L. Magnone, et al. Lemur iib: a robotic system for steep terrain access. *Industrial Robot: An International Journal*, 33(4):265–269, 2006.
- [122] C. Kertész and M. Turunen. Exploratory analysis of sony aibo users. *AI & SOCIETY*, pages 1–14, 2018.
- [123] J. Kim, A. Alspach, and K. Yamane. Snapbot: A reconfigurable legged robot. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 5861–5867. IEEE, 2017.
- [124] S. Kim, J. E. Clark, and M. R. Cutkosky. isprawl: Design and tuning for high-speed autonomous open-loop running. *The International Journal of Robotics Research*, 25(9):903–912, 2006.
- [125] H. Kimura and Y. Fukuoka. Biologically inspired adaptive dynamic walking in outdoor environment using a self-contained quadruped robot: 'tekken2'. In *Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 1, pages 986–991. IEEE, 2004.
- [126] S. Kitano, S. Hirose, and G. Endo. Design and development of quadruped robot titan-xiii. *JOURNAL OF JAPAN SOCIETY FOR DESIGN ENGINEERING*, 51(12):875–884, 2016.
- [127] S. Kitano, S. Hirose, G. Endo, and E. F. Fukushima. Development of lightweight sprawling-type quadruped robot titan-xiii and its dynamic walking. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 6025–6030. IEEE, 2013.
- [128] B. Klaassen, R. Linnemann, D. Spennberg, and F. Kirchner. Biomimetic walking robot scorpion: Control and modeling. *Robotics and autonomous systems*, 41(2-3):69–76, 2002.
- [129] G. Klein and D. Murray. Parallel tracking and mapping for small ar workspaces. In *Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pages 1–10. IEEE Computer Society, 2007.
- [130] N. P. Koenig and A. Howard. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In *IROS*, volume 4, pages 2149–2154. Citeseer, 2004.

- [131] H. Kolvenbach, D. Bellicoso, F. Jenelten, L. Wellhausen, and M. Hutter. Efficient gait selection for quadrupedal robots on the moon and mars. In *14th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS 2018)*. ESA Conference Bureau, 2018.
- [132] H. Komatsu, G. Endo, R. Hodoshima, S. Hirose, and E. F. Fukushima. Basic consideration about optimal control of a quadruped walking robot during slope walking motion. In *Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), 2013 IEEE Workshop on*, pages 224–230. IEEE, 2013.
- [133] S. Kongsawasdi, S. Mahasawangkul, and P. Pongsopawijit. Biomechanical parameters of asian elephant (*elephas maximus*) walking gait. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*, 23(3), 2017.
- [134] N. Kottege, C. Parkinson, P. Moghadam, A. Elfes, and S. P. Singh. Energetics-informed hexapod gait transitions across terrains. In *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*, pages 5140–5147. IEEE, 2015.
- [135] A. D. Kuo. Choosing your steps carefully. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 14(2):18–29, 2007.
- [136] B. Kwak and J. Bae. Locomotion of arthropods in aquatic environment and their applications in robotics. *Bioinspiration & biomimetics*, 2018.
- [137] C. Laschi, M. Cianchetti, B. Mazzolai, L. Margheri, M. Follador, and P. Dario. Soft robot arm inspired by the octopus. *Advanced Robotics*, 26(7):709–727, 2012.
- [138] B. S. Lin and S.-M. Song. Dynamic modeling, stability, and energy efficiency of a quadrupedal walking machine. *Journal of Robotic Systems*, 18(11):657–670, 2001.
- [139] E. Lucas. Huitieme recreation - la machine a marcher. *Recreat. Math*, 4:198–204, 1894 (Original in französischer Sprache).
- [140] Lynxmotion. Hexapod roobot kits. Webseite: Hexapod Overview of Lynxmotion, letzter Zugriff: 12.05.2018.
- [141] P. Manoonpong, D. Petersen, A. Kovalev, F. Wörgötter, S. N. Gorb, M. Spinner, and L. Heepe. Enhanced locomotion efficiency of a bio-inspired walking robot using contact surfaces with frictional anisotropy. *Scientific reports*, 6:39455, 2016.
- [142] P. Manoonpong and F. Wörgötter. Neural control for locomotion of walking machines. *parameters*, 3:4, 2008.
- [143] T. McGeer et al. Passive dynamic walking. *I. J. Robotic Res.*, 9(2):62–82, 1990.
- [144] R. B. McGhee. Finite state control of quadruped locomotion. *Transactions of the Society for Computer Simulation*, 9(3):135–140, 1967.
- [145] R. B. McGhee and A. A. Frank. On the stability properties of quadruped creeping gaits. *Mathematical Biosciences*, 3:331–351, 1968.
- [146] R. B. McGhee and G. I. Iswandhi. Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 9(4):176–182, 1979.

- [147] Menzi Muck. MENZI MUCK AG ist der technologie- und marktführer für mobil-schreitbagger aus der schweiz. Webseite: <https://www.menzimuck.com/home/>, letzter Zugriff: 11.01.2019.
- [148] D. Messuri and C. Klein. Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1(3):132–141, 1985.
- [149] O. Michel. Cyberbotics ltd. webotsTM: professional mobile robot simulation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 1(1):5, 2004.
- [150] M. E. Moran. The da vinci robot. *Journal of endourology*, 20(12):986–990, 2006.
- [151] R. Mosher. Test and evaluation of a versatile walking truck. In *Proceedings of off-road mobility research symposium*, pages 359–379, 1968.
- [152] E. Muybridge. *Animal locomotion*. Da Capo Press, 1887.
- [153] K. Nickels, B. Kennedy, H. Aghazarian, C. Collins, M. Garrett, A. Okon, and J. Townsend. Vision-guided self-alignment and manipulation in a walking robot. In *System of Systems Engineering, 2006 IEEE/SMC International Conference on*, pages 6–pp. IEEE, 2006.
- [154] S. Nicolson, G. Bartholomew, and M. Seely. Ecological correlates of locomotion speed, morphometrics and body temperature in three namib desert tenebrionid beetles. *African Zoology*, 19(3):131–134, 1984.
- [155] J. Nishii. Legged insects select the optimal locomotor pattern based on the energetic cost. *Biological cybernetics*, 83(5):435–442, 2000.
- [156] J. Nishii. An analytical estimation of the energy cost for legged locomotion. *Journal of theoretical biology*, 238(3):636–645, 2006.
- [157] K. Nonami, R. K. Barai, A. Irawan, and M. R. Daud. *Hydraulically actuated hexapod robots. M]*, Springer Japan, 2014.
- [158] K. Nonami, Q. Huang, D. Komizo, Y. Fukao, Y. Asai, Y. Shiraishi, M. Fujimoto, and Y. Ikedo. Development and control of mine detection robot comet-ii and comet-iii. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46(3):881–890, 2003.
- [159] S. Ohtsuka, G. Endo, E. F. Fukushima, and S. Hirose. Development of terrain adaptive sole for multi-legged walking robot. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 5354–5359. IEEE, 2010.
- [160] D. E. Orin. *Interactive control of a six-legged vehicle with optimization of both stability and energy*. PhD thesis, The Ohio State University, 1976.
- [161] E. Papadopoulos and D. A. Rey. A new measure of tipover stability margin for mobile manipulators. In *Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, volume 4, pages 3111–3116. IEEE, 1996.

- [162] E. Papadopoulos and D. A. Rey. A new measure of tipover stability margin for mobile manipulators. In *Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, volume 4, pages 3111–3116. IEEE, 1996.
- [163] H.-W. Park, S. Park, and S. Kim. Variable-speed quadrupedal bounding using impulse planning: Untethered high-speed 3d running of mit cheetah 2. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 5163–5170. IEEE, 2015.
- [164] H.-W. Park, P. M. Wensing, and S. Kim. High-speed bounding with the mit cheetah 2: Control design and experiments. *The International Journal of Robotics Research*, 36(2):167–192, 2017.
- [165] H.-W. Park, P. M. Wensing, and S. Kim. High-speed bounding with the mit cheetah 2: Control design and experiments. *The International Journal of Robotics Research*, 36(2):167–192, 2017.
- [166] J.-Y. Park, H. Shim, B.-H. Jun, P.-M. Lee, S.-Y. Yoo, and H. Baek. Measurement of hydrodynamic forces and moment acting on crabster, cr200 using model tests. In *Underwater Technology (UT), 2017 IEEE*, pages 1–5. IEEE, 2017.
- [167] J. Paskarkeit, M. Schilling, J. Schmitz, and A. Schneider. Obstacle crossing of a real, compliant robot based on local evasion movements and averaging of stance heights using singular value decomposition. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 3140–3145. IEEE, 2015.
- [168] G. Peters, D. Pagano, D. Liu, and K. Waldron. A prototype climbing robot for inspection of complex ferrous structures. In *Emerging Trends In Mobile Robotics*, pages 150–156. World Scientific, 2010.
- [169] R. Pfeifer, M. Lungarella, and F. Iida. Self-organization, embodiment, and biologically inspired robotics. *science*, 318(5853):1088–1093, 2007.
- [170] A. Pfister, A. M. West, S. Bronner, and J. A. Noah. Comparative abilities of microsoft kinect and vicon 3d motion capture for gait analysis. *Journal of medical engineering & technology*, 38(5):274–280, 2014.
- [171] Pixabay. Alle bereitgestellten bilder und videos auf pixabay sind gemeinfrei (public domain) entsprechend der verzichtserklärung creative commons cc0. Webseite: <https://pixabay.com/de/>, letzter Zugriff: 06.09.2018.
- [172] Pleo Dino Robot. Pleo is an animatronic pet dinosaur toy manufactured by innvo labs. Webseite: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pleo>, letzter Zugriff: 06.09.2018.
- [173] D. R. Pugh, E. A. Ribble, V. J. Vohnout, T. E. Bihari, T. M. Walliser, M. R. Patterson, and K. J. Waldron. Technical description of the adaptive suspension vehicle. *The International Journal of Robotics Research*, 9(2):24–42, 1990.
- [174] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Y. Ng. Ros: an open-source robot operating system. In *ICRA workshop on open source software*, volume 3, page 5. Kobe, Japan, 2009.
- [175] M. H. Raibert. *Legged robots that balance*. MIT press, 1986.

- [176] P. Ramdya, R. Thandiackal, R. Cherney, T. Asselborn, R. Benton, A. J. Ijspeert, and D. Floreano. Climbing favours the tripod gait over alternative faster insect gaits. *Nature communications*, 8:14494, 2017.
- [177] K. Regenstien. *Modulare, verteilte Hardware-software-Architektur für humanoide Roboter*. KIT Scientific Publishing, 2010.
- [178] L. Ren, M. Butler, C. Miller, H. Paxton, D. Schwerda, M. S. Fischer, and J. R. Hutchinson. The movements of limb segments and joints during locomotion in african and asian elephants. *Journal of Experimental Biology*, 211(17):2735–2751, 2008.
- [179] S. Roberts and D. E. Koditschek. Rhex slips on granular media. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2016.
- [180] T. M. Roehr, F. Cordes, and F. Kirchner. Reconfigurable integrated multirobot exploration system (rimres): heterogeneous modular reconfigurable robots for space exploration. *Journal of Field Robotics*, 31(1):3–34, 2014.
- [181] E. Rohmer, S. P. Singh, and M. Freese. V-rep: A versatile and scalable robot simulation framework. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1321–1326. IEEE, 2013.
- [182] M. Rommerman, D. Kuhn, and F. Kirchner. Robot design for space missions using evolutionary computation. In *2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pages 2098–2105. IEEE, 2009.
- [183] M. E. Rosheim. *Robot evolution: the development of anthrobotics*. John Wiley & Sons, 1994.
- [184] D. Ryczko, V. Charrier, A. Ijspeert, and J.-M. Cabelguen. Segmental oscillators in axial motor circuits of the salamander: distribution and bursting mechanisms. *Journal of neurophysiology*, 104(5):2677–2692, 2010.
- [185] L. A. Rygg. Mechanical horse, Feb. 14, 1893. US Patent 491,927.
- [186] J. K. Salisbury and J. J. Craig. Articulated hands: Force control and kinematic issues. *The International journal of Robotics research*, 1(1):4–17, 1982.
- [187] U. Saranli, M. Buehler, and D. E. Koditschek. Rhex: A simple and highly mobile hexapod robot. *The International Journal of Robotics Research*, 20(7):616–631, 2001.
- [188] M. Schilling, T. Hoinville, J. Schmitz, and H. Cruse. Walknet, a bio-inspired controller for hexapod walking. *Biological cybernetics*, 107(4):397–419, 2013.
- [189] D. Schmidt and K. Berns. Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures—a survey of design aspects and technologies. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12):1288–1305, 2013.
- [190] U. Schmucker, A. Schneider, V. Rusin, and Y. Zavgorodniy. Force sensing for walking robots. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2005)*, pages 25–30, 2005.

- [191] U. Schmucker, A. Schneider, U. Schneider, and T. Ihme. Force control for legged robots. In *In ICAR'97-8th Int. Conf. on Advanced Robotics. Workshop "New Approaches on Dynamic Walking and Climbing Machines*. Citeseer, 1997.
- [192] A. Schneider, H. Cruse, and J. Schmitz. Decentralized control of elastic limbs in closed kinematic chains. *The International Journal of Robotics Research*, 25(9):913–930, 2006.
- [193] A. Schneider, J. Paskarbeit, M. Schaeffersmann, and J. Schmitz. Hector, a new hexapod robot platform with increased mobility-control approach, design and communication. In *Advances in Autonomous Mini Robots*, pages 249–264. Springer, 2012.
- [194] A. Schneider and U. Schmucker. Force legged platform “katharina” for service operations. In *4 Inter. Conf. on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'01*, pages 1029–1036, 2001.
- [195] K. Schreiner. Landmine detection research pushes forward, despite challenges. *IEEE Intelligent Systems*, 17(2):4–7, 2002.
- [196] R. T. Schroer, M. J. Boggess, R. J. Bachmann, R. D. Quinn, and R. E. Ritzmann. Comparing cockroach and whegs robot body motions. In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on*, volume 4, pages 3288–3293. IEEE, 2004.
- [197] R. T. Schroer, M. J. Boggess, R. J. Bachmann, R. D. Quinn, and R. E. Ritzmann. Comparing cockroach and whegs robot body motions. In *IEEE international conference on robotics and automation*, volume 4, pages 3288–3293. Citeseer, 2004.
- [198] C. Semini, J. Goldsmith, D. Manfredi, F. Calignano, E. P. Ambrosio, J. Pakkanen, and D. G. Caldwell. Additive manufacturing for agile legged robots with hydraulic actuation. In *Advanced Robotics (ICAR), 2015 International Conference on*, pages 123–129. IEEE, 2015.
- [199] C. Semini, J. Goldsmith, B. U. Rehman, M. Frigerio, V. Barasuol, M. Focchie, and D. G. Caldwell. Design overview of the hydraulic quadruped robots. In *The Fourteenth Scandinavian International Conference on Fluid Power*, 2015.
- [200] C. Semini, N. G. Tsagarakis, E. Guglielmino, M. Focchi, F. Cannella, and D. G. Caldwell. Design of hyq—a hydraulically and electrically actuated quadruped robot. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 225(6):831–849, 2011.
- [201] S. Seok, A. Wang, M. Y. M. Chuah, D. J. Hyun, J. Lee, D. M. Otten, J. H. Lang, and S. Kim. Design principles for energy-efficient legged locomotion and implementation on the mit cheetah robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(3):1117–1129, 2015.
- [202] P. S. Shamble, R. R. Hoy, I. Cohen, and T. Beatus. Walking like an ant: a quantitative and experimental approach to understanding locomotor mimicry in the jumping spider myrmarachne formicaria. *Proc. R. Soc. B*, 284(1858):20170308, 2017.
- [203] B. Siciliano and O. Khatib. *Springer handbook of robotics*. Springer Science & Business Media, 2008.

-
- [204] M. F. Silva and J. Tenreiro Machado. A historical perspective of legged robots. *Journal of Vibration and Control*, 13(9-10):1447–1486, 2007.
- [205] S.-M. Song and K. J. Waldron. *Machines that walk: the adaptive suspension vehicle*. MIT press, 1989.
- [206] Sony Aibo. AIBO is full of charm and infectious energy. Webseite: <https://us.aibo.com>, letzter Zugriff: 06.09.2018.
- [207] J. C. Spagna, D. I. Goldman, P.-C. Lin, D. E. Koditschek, and R. J. Full. Distributed mechanical feedback in arthropods and robots simplifies control of rapid running on challenging terrain. *Bioinspiration & biomimetics*, 2(1):9, 2007.
- [208] S. Steingrube, M. Timme, F. Wörgötter, and P. Manoonpong. Self-organized adaptation of a simple neural circuit enables complex robot behaviour. *Nature physics*, 6(3):224, 2010.
- [209] I. E. Sutherland and M. K. Ullner. Footprints in the asphalt. *The International Journal of Robotics Research*, 3(2):29–36, 1984.
- [210] M. Taddei. *Leonardo dreidimensional. 2. Neue Roboter und Maschinen*. Belser, 2008.
- [211] F. Tedeschi and G. Carbone. Design issues for hexapod walking robots. *Robotics*, 3(2):181–206, 2014.
- [212] ODE. Opensource physics engine - Open Dynamics Engine in ver. 0.11. details and manual at: ODE Wiki, 2013.
- [213] PhysX. Physics Engine by NVIDIA in ver. 3.1. details and manual at: PhysX 3.1 Release, 2013.
- [214] Y. Torres-Pérez, E. Y. Gómez-Pachón, and F. Miró-Rodríguez. Two-dimensional kinematics of horses at trot through videometry and mathematical modeling. *Facultad de Ingeniería*, 26(45):83–96, 2017.
- [215] M. Travers, J. Whitman, and H. Choset. Shape-based coordination in locomotion control. *The International Journal of Robotics Research*, page 0278364918761569, 2018.
- [216] Trossen Robotics. Phantomx ax hexapod kit. Webseite: letzter Zugriff: 12.05.2018.
- [217] K. Uhl and M. Ziegenmeyer. Mca2—an extensible modular framework for robot control applications. In *Advances in climbing and walking robots*, pages 680–689. World Scientific, 2007.
- [218] T. Von Karman and G. Gabrielli. What price speed? specific power required for propulsion of vehicles. *Mechanical Engineering*, 72:775–781, 1950.
- [219] H. von Sybel. *Triebkraftsteigerung bei Geländefahrzeugen durch das Schub-Schritt-Verfahren*. PhD thesis, Ed. Minerva Tecnica, 1961.
- [220] M. Vukobratović and B. Borovac. Zero-moment point—thirty five years of its life. *International journal of humanoid robotics*, 1(01):157–173, 2004.

- [221] V. Wahl, S. E. Pfeffer, and M. Wittlinger. Walking and running in the desert ant *cataglyphis fortis*. *Journal of Comparative Physiology A*, 201(6):645–656, 2015.
- [222] K. Walas and D. Belter. Messor-verstatile walking robot for search and rescue missions. *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 5:28–34, 2011.
- [223] K. Waldron and R. McGhee. The adaptive suspension vehicle. *IEEE Control Systems Magazine*, 6(6):7–12, 1986.
- [224] J. D. Weingarten, G. A. Lopes, M. Buehler, R. E. Groff, and D. E. Koditschek. Automated gait adaptation for legged robots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004*, volume 3, pages 2153–2158. IEEE, 2004.
- [225] G. J. Wenger, A. M. Johnson, C. J. Taylor, and D. E. Koditschek. Semi-autonomous exploration of multi-floor buildings with a legged robot. In *Unmanned Systems Technology XVII*, volume 9468, page 94680B. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [226] A. Winkler, I. Havoutis, S. Bazeille, J. Ortiz, M. Focchi, R. Dillmann, D. Caldwell, and C. Semini. Path planning with force-based foothold adaptation and virtual model control for torque controlled quadruped robots. In *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, pages 6476–6482. IEEE, 2014.
- [227] H. Witte, M. S. Fischer, H. Preuschoft, D. Voges, C. Schilling, and A. Jan. Quadruped locomotion. *Living machines: A handbook of research in biomimetics and biohybrid systems*, page 289, 2018.
- [228] X. Xiong, F. Wörgötter, and P. Manoonpong. Adaptive and energy efficient walking in a hexapod robot under neuromechanical control and sensorimotor learning. *IEEE transactions on cybernetics*, 46(11):2521–2534, 2016.
- [229] J.-i. Yamaguchi, A. Takanishi, and I. Kato. Development of a biped walking robot compensating for three-axis moment by trunk motion. *Journal of the Robotics Society of Japan*, 11(4):581–586, 1993.
- [230] J.-M. Yang and J.-H. Kim. Fault-tolerant locomotion of the hexapod robot. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 28(1):109–116, 1998.
- [231] L. Yang, C.-M. Chew, Y. Zheng, and A.-N. Poo. Truncated fourier series formulation for bipedal walking balance control. *Robotica*, 28(1):81–96, 2010.
- [232] K. Yoneda and S. Hirose. Tumble stability criterion of integrated locomotion and manipulation. In *Intelligent Robots and Systems' 96, IROS 96, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 2, pages 870–876. IEEE, 1996.
- [233] K. Yoneda and S. Hirose. Three-dimensional stability criterion of integrated locomotion and manipulation. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 9:267–274, 1997.
- [234] S.-y. Yoo, B.-H. Jun, H. Shim, J.-Y. Park, H. Baek, B.-h. Kim, G.-M. Lee, H. Kang, W.-Y. Jeong, S.-H. Baek, et al. Preliminary water tank test of a multi-legged underwater robot for seabed explorations. In *Oceans 2015-mts/ieee washington*, pages 1–6. IEEE, 2015.

- [235] T. Yoshikawa. Manipulability of robotic mechanisms. *The international journal of Robotics Research*, 4(2):3–9, 1985.
- [236] D. Zarrouk and R. S. Fearing. Cost of locomotion of a dynamic hexapedal robot. In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, pages 2548–2553. IEEE, 2013.
- [237] S. Zhang, J. Gao, X. Duan, H. Li, Z. Yu, X. Chen, J. Li, H. Liu, X. Li, Y. Liu, et al. Trot pattern generation for quadruped robot based on the zmp stability margin. In *Complex Medical Engineering (CME), 2013 ICME International Conference on*, pages 608–613. IEEE, 2013.
- [238] M. Ziegenmeyer. Entwicklung einer semantischen missionssteuerung für autonome inspektionsroboter. 2011.
- [239] T. Zielinska. Development of walking machines; historical perspective. In *International Symposium on History of Machines and Mechanisms*, pages 357–370. Springer, 2004.

Studentische Abschlussarbeiten

- [Bil12] Christian Billet. Entwicklung eines hoch integrierten Elektronik-Steuer-Moduls für einen Laufroboter. Bachelorarbeit, Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft und FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, Betreuer: Arne Rönnau, 2012.
- [Bü15] Timothee Büttner. Entwicklung einer optimalen Kinematik für einen mehrbeinigen Geräteträger. Masterarbeit, KIT und FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, Betreuer: Georg Heppner, Co-Betreuer: Arne Rönnau, 2015.
- [Hel12] David Hellmeister. Frei konfigurierbare Fußpunkttrajektorien für vier-, sechs- und achtbeinige kinematische Modelle. Studienarbeit, KIT und FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, Betreuer: Arne Rönnau, 2012.
- [Hep11] Georg Heppner. Analyse und Optimierung der Energieeffizienz eines sechsbeinigen Laufroboters. Masterarbeit, KIT und FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, Betreuer: Arne Rönnau, 2011.
- [Hub15] Roman Huber. Optimierung und Analyse von Fußpunkt-Trajektorien sechsbeiniger Laufroboter für effizientes mehrbeiniges Laufen. Studienarbeit, KIT und FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, Betreuer: Arne Rönnau, 2015.
- [Hü14] Nicolas Hügel. Biologisch inspirierte Fußkonzepte für einen sechsbeinigen Laufroboter. Bachelorarbeit, KIT und FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, Betreuer: Arne Rönnau, 2014.
- [Kat13] Roman Katchan. Entwurf eines dynamischen Reglers zur Steigerung der Agilität eines sechsbeinigen Laufroboters. Diplomarbeit, KIT und FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, Betreuer: Arne Rönnau, 2013.
- [Koc10] Kai Henning Koch. Entwicklung eines Leichtbau-Zentralkörpers für die nächste Generation einer sechsbeinigen Laufmaschine. Diplomarbeit, KIT und FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, Betreuer: Arne Rönnau, 2010.
- [Kon10] Dong-Uck Kong. Modellbasierte Hybridregelung eines Laufmaschinenbeins mit vier Bewegungsfreiheitsgraden. Diplomarbeit, KIT und FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, Betreuer: Arne Rönnau, 2010.
- [Pla15] Carsten Plasberg. Optimierung der verhaltensbasierten Körperbewegung für sechsbeinige Laufmaschinen in unstrukturiertem Gelände. Bachelorarbeit, KIT und FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, Betreuer: Georg Heppner, Co-Betreuer: Arne Rönnau, 2015.
- [Sch14] Stefan Scherzinger. Optimierung der Beinansteuerung eines sechsbeinigen Laufroboters auf Basis eines Dynamikmodells unter Berücksichtigung von Stabilität, Gelenkbelastung und

Energieverbrauch. Diplomarbeit, KIT und FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, Betreuer: Arne Rönnau, 2014.

- [Sut12] Florian Sutter. Development of a Dynamics Simulation Environment for a Multi-Legged Walking Robot. Masterarbeit, KIT und FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, Betreuer: Arne Rönnau, 2012.

Eigene Veröffentlichungen im Rahmen dieser Arbeit

- [Buettner et al., 2017] Buettner, T., Roennau, A., Heppner, G., and Dillmann, R. (2017). Design of an exchangeable, compact and modular bio-inspired leg for six-legged walking robots. In *Human-Centric Robotics: Proceedings of the 20th International Conference on CLAWAR 2017*, page 89. World Scientific.
- [Büttner et al., 2016] Büttner, T., Roennau, A., Heppner, G., Pfozter, L., and Dillmann, R. (2016). Bio-inspired optimization of kinematic models for multi-legged walking robots. In *Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2016 6th IEEE International Conference on*, pages 430–435. IEEE.
- [Goeller et al., 2011] Goeller, M., Roennau, A., Gorbunov, A., Heppner, G., and Dillmann, R. (2011). Pushing around a robot: Force-based manual control of the six-legged walking robot lauron. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pages 2647–2652. IEEE.
- [Heppner et al., 2017] Heppner, G., Roennau, A., and Dillmann, R. (2017). Exploration and sample-return missions with a walking robot. In *2017 Proceedings of the 2017 ESA International Conference on Automation and Robotics in Space (ASTRA)*.
- [Heppner et al., 2015] Heppner, G., Roennau, A., Oberländer, J., Klemm, S., and Dillmann, R. (2015). Laurope-six legged walking robot for planetary exploration participating in the spacebot cup. *WS on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation*.
- [Heppner et al., 2013] Heppner, G., Roennau, A., and Ruediger, D. (2013). Enhancing sensor capabilities of walking robots through cooperative exploration with aerial robots. *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 7.
- [Kerscher et al., 2008a] Kerscher, T., Roennau, A., Ziegenmeyer, M., Gassmann, B., Zoellner, J., and Dillmann, R. (2008a). Behaviour-based control of the six-legged walking machine lauron ivc. In *Advances In Mobile Robotics*, pages 736–743. World Scientific.
- [Kerscher et al., 2008b] Kerscher, T., Roennau, A., Ziegenmeyer, M., Gassmann, B., Zoellner, M., and Dillmann, R. (2008b). Using behaviour networks for six legged walking in rough terrain. In *International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines AMAM2008, (Cleveland, OH, USA, 2008)*.
- [Oberländer et al., 2014] Oberländer, J., Klemm, S., Heppner, G., Roennau, A., and Dillmann, R. (2014). A multi-resolution 3-d environment model for autonomous planetary exploration. In *Automation Science and Engineering (CASE), 2014 IEEE International Conference on*, pages 229–235. IEEE.
- [Pfozter et al., 2014] Pfozter, L., Oberlaender, J., Roennau, A., and Dillmann, R. (2014). Development and calibration of karola, a compact, high-resolution 3d laser scanner. In *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2014 IEEE International Symposium on*, pages 1–6. IEEE.
- [Roennau et al., 2011a] Roennau, A., Heppner, G., and Dillmann, R. (2011a). Bio-inspired heterogeneous step sizes for a six-legged walking robot. In *AMAM2011, (Hyogo, Japan, 2011)*.

- [Roennau et al., 2014a] Roennau, A., Heppner, G., and Dillmann, R. (2014a). Online adaptive leg trajectories for multi-legged walking robots. In *Mobile Service Robotics*, pages 369–376. World Scientific.
- [Roennau et al., 2014b] Roennau, A., Heppner, G., and Dillmann, R. (2014b). A six-legged walking robot designed for mobile manipulation. In *Dynamic Walking Conference 2014, ETH Zurich, Switzerland*.
- [Roennau et al., 2010a] Roennau, A., Heppner, G., Kerscher, T., and Dillmann, R. (2010a). A behaviour-based free gait inspired by a walking stick insect. In *Emerging Trends In Mobile Robotics*, pages 181–188. World Scientific.
- [Roennau et al., 2011b] Roennau, A., Heppner, G., Kerscher, T., and Dillmann, R. (2011b). Fault diagnosis and system status monitoring for a six-legged walking robot. In *2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pages 874–879. IEEE.
- [Roennau et al., 2015] Roennau, A., Heppner, G., Klemm, S., and Dillmann, R. (2015). Roads — robot and dynamics simulation for biologically-inspired multi-legged walking robots. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pages 1870–1876.
- [Roennau et al., 2014c] Roennau, A., Heppner, G., Nowicki, M., and Dillmann, R. (2014c). Lauron v: a versatile six-legged walking robot with advanced maneuverability. In *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 82–87. IEEE.
- [Roennau et al., 2014d] Roennau, A., Heppner, G., Nowicki, M., Zöllner, J. M., and Dillmann, R. (2014d). Reactive posture behaviors for stable legged locomotion over steep inclines and large obstacles. In *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 4888–4894. IEEE.
- [Roennau et al., 2012a] Roennau, A., Heppner, G., Pfotzer, L., and Dillmann, R. (2012a). Foot design evaluation for a six-legged walking robot. In *Adaptive Mobile Robotics*, pages 511–518. World Scientific.
- [Roennau et al., 2013a] Roennau, A., Heppner, G., Pfotzer, L., and Dillmann, R. (2013a). Lauron v: Optimized leg configuration for the design of a bio-inspired walking robot. In *Nature-Inspired Mobile Robotics*, pages 563–570. World Scientific.
- [Roennau et al., 2010b] Roennau, A., Kerscher, T., and Dillmann, R. (2010b). Design and kinematics of a biologically-inspired leg for a six-legged walking machine. In *Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), 2010 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on*, pages 626–631. IEEE.
- [Roennau et al., 2012b] Roennau, A., Kerscher, T., and Dillmann, R. (2012b). Dynamic position/force controller of a four degree-of-freedom robotic leg. In *Robot Motion and Control 2011*, pages 117–126. Springer.
- [Roennau et al., 2009a] Roennau, A., Kerscher, T., Ziegenmeyer, M., Zoellner, J., and Dillmann, R. (2009a). Six-legged walking in rough terrain based on foot point planning. In *Mobile robotics: Solutions and challenges*, pages 591–598. World Scientific.
- [Roennau et al., 2009b] Roennau, A., Kerscher, T., Ziegenmeyer, M., Zöllner, J. M., and Dillmann, R. (2009b). Adaptation of a six-legged walking robot to its local environment. In *Robot Motion and Control 2009*, pages 155–164. Springer.

- [Roennau et al., 2013b] Roennau, A., Sutter, F., Heppner, G., Oberländer, J., and Dillmann, R. (2013b). Evaluation of physics engines for robotic simulations with a special focus on the dynamics of walking robots. In *2013 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pages 1–7. IEEE.
- [Roennau et al., 2012c] Roennau, A., Sutter, F., Kerscher, T., and Dillmann, R. (2012c). On-board energy consumption estimation for a six-legged walking robot. In *Field Robotics*, pages 547–554. World Scientific.