

Modellbasierte Entwicklung des Bewegungsapparates eines biologisch inspirierten, vierbeinigen Roboters

Model-Based Development of a Biologically Inspired Quadruped Robot Locomotory System

Master-Thesis von Stefan Kurowski
September 2009



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Modellbasierte Entwicklung des Bewegungsapparates eines biologisch inspirierten, vierbeinigen Roboters

Model-Based Development of a Biologically Inspired Quadruped Robot Locomotory System

vorgelegte Master-Thesis von Stefan Kurowski

1. Gutachten: Prof. Dr. Oskar von Stryk

2. Gutachten: Dipl.-Inform. Katayon Radkhah

Tag der Einreichung:

Erklärung zur Master-Thesis

Hiermit versichere ich die vorliegende Master-Thesis ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 2. September 2009

(Stefan Kurowski)



Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Master-Arbeit befasst sich mit der modellbasierten Entwicklung eines biologisch inspirierten Vierbeiners. Neben den Anforderungen an die Konstruktionsmethodik und an die Anzahl der Beine soll der Roboter mehrere Gangarten beherrschen und sich möglichst tierähnlich fortbewegen. Dazu soll die Artikulation der Beine unteraktuiert sein, also über weniger Antriebe als Freiheitsgrade (DOF) verfügen.

In der Ausarbeitung wird mit Hilfe eines MATLAB-Simulink-Modells bewiesen, dass eine tierähnliche Fortbewegung mit unteraktuierten Beinen nicht nur möglich ist, sondern dass bei einem solchen Ansatz sogar ohne Regelung eine Vielzahl an Gangarten erreicht werden kann. Außerdem wird gezeigt, dass sich die entwickelte Kinematik auch auf unregelmäßigem Untergrund und bei Lenkung robust bewegt. Für diesen regelungsfreien Ansatz beschreibt die vorliegende Arbeit nicht nur geeignete Parameter zur Unterscheidung und Definition von Gangarten, sondern bietet auch eine Lösung zur einfachen Steuerung an.

Während des gesamten dargestellten Entwicklungsprozesses wird auch auf die technische Realisierbarkeit des Modells geachtet. Eine große Rolle spielen hierbei das realitätsnah gehaltene Simulink-Modell, sowie spezielle Techniken zur Reduzierung des Gesamtgewichts des Roboters. Hierzu gehören zum Beispiel die Imitation von Bewegungen wie sie durch Änderung der Federsteifigkeit mithilfe einer intelligenten Ansteuerung der Module erreicht werden kann, anstelle des Einsatzes eines Stellmotors zur tatsächlichen Änderung der Federsteifigkeit.

Neben verschiedenen Untersuchungen an dem Modell, besonders zur Verbesserung der Stabilität und zur Steuerbarkeit durch ein bionisches Lenkmodul beinhaltet diese Arbeit auch Konstruktionspläne mit den dazugehörigen Daten zur Erstellung eines Prototypen auf Basis der Ergebnisse der Entwicklung. Hier spielt der Einsatz von konstruktivem Leichtbau eine große Rolle um nicht nur die technische Umsetzbarkeit des Modells zu garantieren, sondern auch um den Energieverbrauch des Gesamtsystems durch ein geringes Gewicht zu minimieren.



Abstract

This Master-Thesis examines the model-based development of a biological inspired quadruped. In addition to the design requirements of the design methodology and the number of legs, the robot should master multiple gaits, as well as an animal-like action as close to reality as possible. To achieve this, the articulation of the legs is to be under-actuated by having fewer drives than degrees of freedom (DOF).

With the aid of the MATLAB-Simulink model, the report demonstrates that an animal-like under-actuated movement is possible even without the use of a closed-loop control. It also shows that the developed kinematics allows a large variety of gaits and that robust movement is possible even on rough terrain and during steering processes. For this approach, without closed-loop control, the thesis describes appropriate parameters for the differentiation and the definition of gaits. This thesis also offers a solution to easily control the mechanism.

Throughout the development process, special attention is paid to the technical feasibility of the model. A major-role is played by the realistic Simulink model as well as special techniques to reduce the overall weight of the robot. These techniques include the imitation of movements by changing the spring stiffness using an intelligent control, rather than an extra servo-motor for the actual modification of the spring-stiffness.

In addition to improving the stability and the controllability by a bionic steering-module, this report includes plans with all the necessary data to construct a prototype. These instructions are based on the results from the development process. The development demonstrated that the lightweight construction is important to the durability of the model. Additionally, the low overall weight of the system reduces the model's energy consumption.



Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
1. Einführung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Simulationsumgebung	2
1.3. Überblick	2
2. Stand der Forschung	5
2.1. Momentaner Roboterbestand - Einige Beispiele	5
2.2. Gangarten	7
2.3. Variable Federsteifigkeit	10
2.4. Biologisch inspirierte Werkstoffe und Antriebe	11
2.4.1. Künstliche Knochen	11
2.4.2. Künstliche Muskeln	12
2.5. Simulationsbasierte Entwicklung	13
3. Modellierung	15
3.1. MATLAB Simulink	15
3.2. Modellfindung	15
3.3. Aufbau des Modells	16
3.3.1. Struktureller Aufbau	16
3.3.2. Elastischer Antrieb	21
3.3.3. Steuerung des Modells	22
3.4. Simulink Struktur	25
3.4.1. Übersicht	25
3.4.2. Steuerung	27
3.4.3. Bein	28
3.4.4. Antriebsmodule	29
3.4.5. Bodenkontakt	30
3.4.6. Emulierte Federsteifigkeit	33
3.5. Bewertung des Modells	34
3.6. Zusammenfassung	36
4. Simulation und Optimierung	37
4.1. Übersicht	37

4.2. Beinformen	37
4.3. Gangarten	42
4.4. Emulierte Federsteifigkeit	44
4.5. Lenkung	46
4.6. Vergleich des Modells mit anderen Robotern	48
5. Konstruktion	49
5.1. Unigraphics	49
5.2. Erläuterungen zum Modell	49
5.3. Konstruktionspläne	50
5.3.1. Stückliste	50
5.3.2. Baugruppenstruktur	50
5.3.3. Baupläne	50
5.4. Technische Daten	55
6. Fazit und Ausblick	57
6.1. Fazit	57
6.2. Ausblick	57
Literaturverzeichnis	XI
A. Anhang	XV
A.1. Explosionsansichten	XV
A.2. Konstruktionspläne	XXI

Abbildungsverzeichnis

1.	„Big Dog“ von Boston Dynamics	6
2.	Gangarten eines Vierbeiners	9
3.	Abstraktion eines Schäferhund-Hinterbeines	17
4.	Vergleich der Position von vollaktuiertem mit unteraktuiertem Bein während der Bewegung	18
5.	Vergleich der Winkelgeschwindigkeit von vollaktuiertem mit unteraktuiertem Bein während der Bewegung	19
6.	Vergleich des gemessenen mit dem Simulierten Bewegungsablauf	19
7.	Struktureller Aufbau des Modells	20
8.	Gangbild eines Hundes	21
9.	Vergleich der Wirkweise bei tatsächlicher Änderung der Federsteifigkeit und emulierter Änderung der Federsteifigkeit	24
10.	Übersicht über das Simulink Modell	26
11.	Simulink-Darstellung der Steuerung	27
12.	Simulink-Darstellung eines Beins	28
13.	Simulink-Darstellung des Antriebsmoduls	29
14.	Simulink-Darstellung des Bodenkontaktmodells	31
15.	Simulink-Darstellung der Torsionsberechnung	31
16.	Simulink-Darstellung der Berechnung der orthogonalen Projektion	32
17.	Simulink-Darstellung des Moduls für die emulierte Federsteifigkeit	33
18.	Vergleich von verschiedenen Beinkinematiken	38
19.	Graphendarstellung der Gütefunktion der Optimierung	41
20.	Die zweite Nebenbedingung der Optimierung	41
21.	Variation der emulierten Federsteifigkeit führt zu erhöhter Froude-Zahl	43
22.	Geschwindigkeitsänderung durch Variation der emulierten Federsteifigkeit und der Periodendauer	43
23.	Geschwindigkeitsänderung durch Variation aller Parameter	44
24.	Gangartenwechsel bei Variation der Steifigkeiten im Vergleich	45
25.	Geschwindigkeitsvergleich bei Variation der Federsteifigkeit	46
26.	Vergleich der Fußpunkte bei variiertes Federsteifigkeit	47
27.	Darstellung der gelaufenen Route bei verschiedenen Lenkeinschlägen	47
28.	Isometrische Ansicht des Modells	52
29.	Explosionsdarstellung der Baugruppe Assembly	XV
30.	Explosionsdarstellung der Baugruppe Korpus	XVI

31.	Explosionsdarstellung der Baugruppe Lenker	XVI
32.	Explosionsdarstellung der Baugruppe Bein, hinten rechts	XVII
33.	Explosionsdarstellung der Baugruppe Oberschenkel hinten	XVIII
34.	Explosionsdarstellung der Baugruppe Unterschenkel hinten	XVIII
35.	Explosionsdarstellung der Baugruppe Fuß hinten	XIX
36.	Explosionsdarstellung der Baugruppe Unterbau	XIX
37.	Explosionsdarstellung der Baugruppe Achslager	XX

Tabellenverzeichnis

1.	Systemspezifikationen der Simulationsumgebung	2
2.	Kennzahlen zur Einordnung von vierbeinigen Gangarten	9
3.	Begriffe aus dem Simulink Modell der emulierten Federsteifigkeit	34
4.	Vergleich verschiedener Beinstrukturen	38
5.	Vergleich verschiedener Längenverhältnisse im Pantographenbein	40
6.	Optimierungsparameter	41
7.	Ergebnisse der Optimierung	42
8.	Stückliste	51
9.	Baugruppenstruktur Assembly	51
10.	Technische Daten	52
11.	Baugruppenstruktur Korpus	53
12.	Baugruppenstruktur Lenker	54



1 Einführung

1.1 Motivation

Das Robot Institute of America definiert einen Roboter als „ein programmierbares Mehrzweck-Handhabungsgerät für das Bewegen von Material, Werkstücken, Werkzeugen oder Spezialgeräten. Der frei programmierbare Bewegungsablauf macht ihn für verschiedenste Aufgaben einsetzbar“. Ein Kernelement eines Roboters ist nach dieser Definition also die Bewegung. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einer besonders eleganten Lösung des Problems der Fortbewegung bei Robotern: durch die Imitation der Natur.

Die Eleganz der Natur technisch nutzbar zu machen ist eine grundlegende Idee der Bionik¹. Das Internationale Zentrum für Bionik beschreibt die Bionik (auch Biomimese) als ein „Lernen“ „von der Weisheit der Natur“ [1]. Durch die Natur liegen uns in Jahrtausenden erfolgreich getestete Lösungen für Probleme aus nahezu allen Teilbereichen der Wissenschaften vor. Ziel der Bionik ist es nicht, eine simple Kopie anzufertigen, sondern die zugrundeliegenden Prinzipien und Mechanismen zu verstehen und für den Menschen nutzbar zu machen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Prinzipien aus der Anthropobionik verwendet. Diese beinhaltet die Entwicklung und Konstruktion eines vierbeinigen Tiermodells anhand eines lebenden Vorbilds.

Das zwei- und vierbeinige Gehen von Maschinen stellt besondere Herausforderungen an die Technik dar. Trotz erheblichen Fortschrittes im Bereich der Robotertechnik scheint die Forschung im Bereich des Gehens bei Robotern nur langsam voran zu schreiten, obwohl diese Art der Fortbewegung eine große Reihe an Einsatzmöglichkeiten birgt. Sei es die Erforschung schwer zu erreichender Gebiete, wie Vulkane [2], ferne Planeten [3, 4, 5] oder den Meeresgrund [6, 7], sei es der Einsatz in lebensfeindlicher oder gefährlicher Umgebung wie strahlenbelastetes Gebiet [8], zur Minenerkundung [9, 10], für Such- und Rettungsmissionen [11] oder zur Minenräumung [12, 13, 14], um nur einige zu nennen.

Ein weiteres noch nicht ausreichend erforschtes Thema ist der Einsatz von verschiedenen Gangarten bei beiniger Fortbewegung [15]. Ab einer bestimmten Geschwindigkeit, abhängig von der Beinlänge [16], wechselt ein Lebewesen sei es Mensch oder Tier in eine höhere Gangart. Dieser Wechsel ist für den Einsatz in Laufrobotern durchaus interessant, da bei einem Roboter hierdurch beispielsweise die Höchstgeschwindigkeit bei gleichbleibender Morphologie erhöht werden kann.

¹ Bionik ist ein Kunstwort, zusammengesetzt aus Biologie und Technik. Der Begriff wurde 1960 von Luftwaffenmajor Jack Steele bei einer Konferenz geprägt

CPU	Intel(R) Core(TM) 2 Quad 9650 @ 3,0 GHz
Arbeitsspeicher	4096 MB
System	Microsoft Windows Vista 64
MATLAB	R2008b 64bit

Tabelle 1.: Systemspezifikationen der Simulationsumgebung

Nicht zuletzt muss der Einsatz eines bionischen Bewegungsapparates in der Forschung genannt werden. Es gestaltet sich beispielweise heute immernoch schwierig, eine Beinprothese zu konstruieren, die mehrere Gangarten beherrscht [17]. Eine detaillierte Untersuchung der exakten Bewegungsabläufe eines biologisch inspirierten, beinigen Roboters und die dafür benötigte genaue Analyse der tierischen Vorbilder [18] stellt eine Möglichkeit dar, diese Problematik näher zu erforschen. Als Grundlage für solche und ähnliche Untersuchungen soll der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte vierbeinige Laufroboter dienen.

Die Entwicklung des Laufroboters erfolgt mit Hilfe einer Simulationsumgebung. Ein solcher simulationsgestützter Entwicklungsprozess verläuft im Gegensatz zum klassischen, auf Konzepte, Entwürfe und Erfahrungen aufbauenden Entwicklungsprozesses, deutlich schneller bei gleicher Qualität [19]. Der konkrete Ablauf bezogen auf das vorliegende Projekt beginnt mit der Erstellung eines mechanischen Modells zur mathematischen Beschreibung der Systemzusammenhänge, gefolgt von einer Simulation mit Hilfe des Programms MATLAB² Simulink. Die aus der Simulation gewonnenen Erkenntnisse können iterativ in eine Verbesserung der Modellgleichungen einfließen. Liegt ein stabiles Modell vor, wird dies, ebenfalls mit der Software MATLAB, auf verschiedene Eigenschaften wie Gewicht oder Energieverbrauch hin optimiert. Das Ergebnis dieses Prozesses wird letzten Endes mit der CAD Software Unigraphics³ NX 6 modelliert und als Konstruktionsplan verfügbar gemacht.

1.2 Simulationsumgebung

Die Modellierung und Simulation wurde auf einem Einzelplatz-Computer durchgeführt. Eine Auslagerung der Berechnungen auf die Grafikkarte konnte nicht realisiert werden. Die genauen Systemspezifikationen der zur Entwicklung benutzten Simulationsumgebung sind in Tabelle 1 aufgetragen. Die genauen Solver- und Optimierungseinstellungen werden in Kapitel 4 näher beschrieben.

1.3 Überblick

Der weitere Ablauf der vorliegenden Arbeit beginnt mit einer Übersicht über den aktuellen Stand der Forschung im Bereich der beinigen Fortbewegung von Robotern in Kapitel 2. Außerdem wird auf die neusten Technologien in den betreffenden Bereichen aus der Bionik und der

² The MathWorks Inc 1984-2009

³ Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. 2009

modellbasierten Entwicklung eingegangen.

Es folgt in Kapitel 3 die Beschreibung der Erstellung des Modells. Zunächst wird hierfür der prinzipielle Aufbau der Kinematik, der Antriebe und der Steuerung beschrieben, gefolgt von der Beschreibung der Umsetzung dieser Elemente im Programm MATLAB Simulink und MATLAB SimMechanics. Die Schilderung der Modellierung wird beendet durch eine Bewertung des Modells, in der auf Ungenauigkeiten und Abweichungen zwischen Modellgleichungen und Realität eingegangen wird, und einer abschließenden Zusammenfassung der besonderen Eigenschaften des Modells.

Das Kapitel 4 befasst sich mit Untersuchungen an dem entwickelten Modell. Besonders eingegangen wird hier auf die verschiedenen Ansätze unteraktuierter Beinmodelle und insbesondere Gliederlängen, welche durch eine Optimierung ermittelt werden. Außerdem wird durch die Variation verschiedener Steuerungsparameter gezeigt, dass das Modell die Fähigkeit besitzt verschiedene Gangarten einzusetzen. Der Beweis der Lenkbarkeit des Modells schließt diesen Abschnitt ab.

Darauf folgen in Kapitel 5 die Konstruktionsanweisungen für einen Prototypen des Laufroboters als Fertigungspläne, Stücklisten und Baugruppenstrukturen. Darüber hinaus werden hier der Ansatz des konstruktiven Leichtbaus näher erläutert und technische Daten zum Modell genannt.

Die Arbeit schließt ab mit einem Fazit und den auf diese Arbeit folgenden nächsten Schritten in der Konstruktion und in der speziellen Verwendung des beschriebenen Laufroboters in Kapitel 6.



2 Stand der Forschung

2.1 Momentaner Roboterbestand - Einige Beispiele

Die Idee einen Laufroboter zu konstruieren ist nicht neu. Auch, sich dabei die Natur zum Vorbild zu nehmen, ist eine Herangehensweise, die bereits häufig gewählt wurde. Die Vorbilder mehrbeiniger Roboter stammen meist aus der Tierwelt. Aufgrund ihrer starren Struktur und simplen dynamischen Abläufe einfach zu realisieren und daher häufig gewählt, werden Insekten wie beispielsweise die Stabheuschrecke [20, 21, 22] oder die Kakerlake [23, 24, 25]. Generell muss man allerdings anmerken, dass eine möglichst exakte Kopie eines Tieres aus energetischen und mechanischen Gründen zwar wünschenswert, technisch aber, zumindest momentan noch nicht umsetzbar ist. Eine alternative Herangehensweise ist es daher, die Funktionen und Prinzipien des strukturellen Aufbaus der Tiere zu verstehen und nachzuahmen. Es gibt aber auch Roboter, die ihrem tierischen Vorbild in Aufbau und Funktion sehr ähneln.

Ein Beispiel für eine nahezu perfekte Kopie eines Tieres, ist der Boston Dynamics Dog [26], zu sehen in der Abbildung 1. Deutlich zu erkennen ist der skellettartige strukturelle Aufbau dieser Maschine. Die Energieversorgung übernimmt hier ein Benzinmotor, welcher nicht nur die benötigte Leistung bringt, sondern auch für ein hohes Maß an Autonomie sorgt. Die Bewegungen der einzelnen Gelenke werden mit Hydraulikzylindern ausgeführt. Die große Menge an Mess- und Regelungstechnik erlaubt dem Boston Dynamics Dog autonom auf Störungen zu reagieren und diese mit seiner immensen Motorleistung schnell auszugleichen. Auch beherrscht der Boston Dynamics Dog verschiedene Gangarten wie Schritt, Trab und eine Art Gallop. Ein mögliches Einsatzgebiet für diese Maschine ist das Militär, da sie neben dem hohen Maß an Autonomie und der Fähigkeit auf Störungen zu reagieren nicht nur geeignet ist für die Beschreitung unwegsamen Geländes, sondern durch die bionische Struktur auch extrem hohe Lasten von bis zu 154 kg tragen kann.

Der Roboterhund Tekken, entwickelt von Kimura und Cohen an der University of Electro-Communications in Tokyo ist ein weiteres Beispiel von autonomen Laufroboters [27]. Die aktuellste Version dieses Roboters heißt Tekken IV und soll nach Abschluss der Entwicklung als Assistenthund für behinderte Menschen dienen [28]. Tekken IV besitzt pro Bein vier angetriebene Gelenke. Inklusive der beiden Kopfgelenke und des Gelenks zur Bewegung des Schwanzes, verfügt diese Maschine über insgesamt 19 Freiheitsgrade⁴. Beachtenswert ist die Höchstgeschwindigkeit des autonom reagierenden Roboters von etwa 1,5 m/s, die er ohne externe Stromversorgung erreicht [29].

⁴ im Folgenden auch: Degrees of Freedom oder DOF

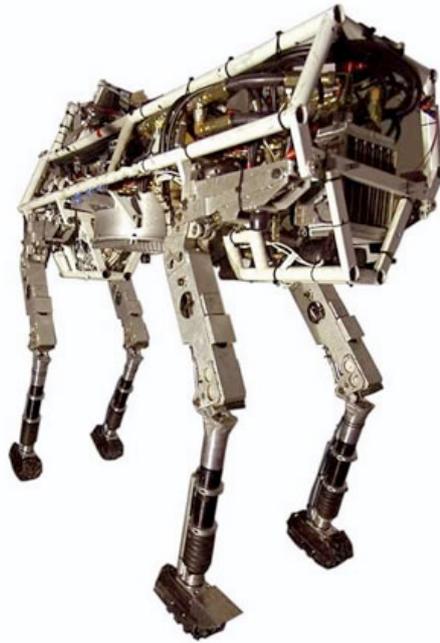


Abbildung 1.: „Big Dog“ von Boston Dynamics [26]

Zur Erforschung biologischer Prinzipien in Bezug auf beinige Fortbewegung dient der Roboterhund Puppy der Universität Zürich, entwickelt von Iida und Pfeifer [30]. Dieser Roboter orientiert sich sowohl in seinem Aufbau, als auch in den Größenverhältnissen an einem realen Hund. Puppy besitzt 28 Gelenke, von denen die meisten durch künstliche Muskeln angetrieben werden. Besonderheit dieses Roboters ist der passive elastische Antrieb, der die untersten Glieder der Beine über einen Pantographen-Mechanismus⁵ bewegt.

Einer der sehr wenigen kommerziellen Laufroboter ist der mittlerweile nicht mehr hergestellte SONY Aibo [31]. Die Produktion der letzten Version ERS-7 wurde im Dezember 2005 eingestellt. Aibo ist ein Unterhaltungsgerät, das sich vollständig autonom bewegen und definierte Befehle ausführen kann. Jedes Aibo-Bein besitzt drei Gelenke, die über Servos betrieben werden. Die Gesamtzahl der DOF eines Aibo ERS-7 liegt bei 20, wovon fünf für die Bewegung von Schnauze, Ohren und Schwanz verwendet werden, somit keine Rolle für die beinige Bewegung spielen. Interessant ist Aibo besonders hinsichtlich der Programmierung, da SONY hierfür eine einfache Schnittstelle zur Verfügung stellt und Aibo dadurch häufig als eine Basis für die Entwicklung von künstlicher Roboterintelligenz fungiert. Aibo lässt durch die starren Antriebe keine anderen Gangarten als den Schritt zu.

Einen etwas abstrakteren Bewegungsapparat, abgeschaut bei einer Kakerlake [32], besitzt der sechsbeinige Roboter RHex der McGill Universität Montreal. Im Gegensatz zu anderen Laufrobotern kommt RHex gänzlich ohne Sensorik aus und zeigt bei nur einem Gelenk pro Bein eine bemerkenswerte Stabilität. Inspiriert von der Kakerlake mit einem äußerst niedrigen Schwerpunkt und sechs sehr leichten, elastischen Beinen ausgestattet, überwindet RHex auch große

⁵ Siehe hierzu Kapitel 3.3.1

Hindernisse äußerst schnell und zeigt insgesamt ein sehr robustes Verhalten gegenüber Störungen [33, 34].

Betrachtet man aktuelle Laufroboter wird auffällig, dass es trotz der vielen Vorteile, wie zum Beispiel die Geländegängigkeit oder die Schonung des Untergrundes, momentan keine kommerziellen dieser Art gibt. Die Gründe dafür sind hauptsächlich der zu hohe Energiebedarf, die zu geringe Geschwindigkeit und die Komplexität, mit der damit verbundenen Fehleranfälligkeit und dem hohem Wartungsaufwand, einer solchen Maschine. Vergleicht man jedoch diese Punkte mit den natürlichen Vorbildern zeigt sich ein großes Forschungspotential, da gerade die eben genannten Eigenschaften herausragende Qualitäten einiger Lebewesen sind.

2.2 Gangarten

Menschen und Tiere nutzen die Fortbewegung in verschiedenen Gangarten um die Fortbewegung besser an die jeweiligen Gegebenheiten anzupassen. Es ist dadurch möglich bei konstanter Morphologie sowohl nahezu beliebiges Terrain zu überqueren, als auch energieeffizient hohe Geschwindigkeiten zu erreichen [35]. Es wird dabei zwischen statisch stabilen und dynamisch stabilen Gangarten unterschieden. Statisch stabile Gangarten sind dadurch definiert, dass sich zu jeder Zeit der lotrecht auf den Boden projizierte Schwerpunkt innerhalb des von den Kontaktpunkten aufgespannten Polyeders befindet [36]. Es müssen sich also immer mindestens drei Füße auf dem Boden befinden. Lässt sich durch die Bodenkontaktpunkte kein Polyeder mehr aufspannen, spricht man von dynamischer Stabilität.

Zur Bewertung und Einordnung von verschiedenen Gangarten müssen diese zunächst definiert werden. Wohingegen die Definition der Gangart Stehen noch relativ eindeutig durch Geschwindigkeit $v = 0$ gegeben werden kann, ist die der nächst schnelleren, der ersten eigentlichen Gangart im Sinne der Fortbewegung, die des Gehens – bei Zweibeinern – bzw. die Gangart Schritt – bei Vierbeinern – schon aufwändiger. Betrachtet man ein sehr einfaches Beinmodell, indem das Bein als Pendel modelliert wird, so lässt sich hieran das Gehen als Pendeln beschreiben [16]. Gehen in einer angenehmen Geschwindigkeit ist als natürliches Schwingen des Pendels zu verstehen. Die natürliche Schwingungsdauer des mathematischen Pendels ist

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (1)$$

Ein Schritt entspricht einer halben Schwingung und hat somit die Dauer $T/2$. Verfolgt man diesen Ansatz weiter, kommt man auf die Gehgeschwindigkeit

$$v = \frac{\text{Schrittlänge}}{\text{Schrittdauer}} = \frac{L}{T/2} \quad (2)$$

Nimmt man weiterhin an, dass Schrittlänge L und Pendellänge l bzw. Hüfthöhe proportional zusammenhängen

$$L = \gamma l \quad (3)$$

so folgt aus den Gleichungen (1), (2) und (3)

$$v = \frac{\gamma}{\pi} \sqrt{gl} \quad (4)$$

Die Geschwindigkeit hängt demnach von der Quadratwurzel der Beinlänge ab. Gleichung (4) lässt sich umschreiben, um die dimensionslose Froude-Zahl⁶ (5) zu erhalten. Siehe auch [16].

$$Fr = \frac{v^2}{gl} = const. \quad (5)$$

Betrachtet man die allgemeine Definition der Froude Zahl

$$Fr = \frac{\text{Zentrifugalkraft}}{\text{Gewicht}} = \frac{mv^2/l}{mg} \quad (6)$$

wird deutlich, dass es eine maximale Geschwindigkeit v^{\max} gibt, nämlich sobald die Zentrifugalkraft größer wird als das Gewicht. Ist ein solcher Zustand erreicht, würde das Pendel „abheben“. Als Definition kann man ableiten, dass für die Gangart Gehen wie auch den vierbeinigen Schritt, für den die genannten Theorien übertragbar sind, gelten muss

$$0 < Fr < 1 \quad (7)$$

Tatsächlich beweisen Versuche an Tieren, dass die Froude-Zahl für den Übergang zur nächst höheren Gangart, den Trab, schon bei $Fr \approx 0,5$, also deutlich vor dem theoretischen Maximalwert liegt [37]. Da dieser Wert bei nahezu allen Tieren und sogar dem Menschen für den Übergang in die nächst höhere Gangart in der selben Größenordnung liegt, kann die Froude-Zahl als Richtwert für einen solchen Übergang genommen werden. Der Übergang von der vierbeinigen Gangart Trab zum Gallop liegt zwischen $Fr = 2$ und $Fr = 4$.

Ergänzend zur Froude-Zahl muss noch ein weiteres Kriterium zur eindeutigen Unterscheidung der Gangarten herangezogen werden. Betrachtet man die Kontaktphasen der Füße zum Grund, erkennt man, dass bei dynamisch stabilen Gangarten wie Laufen bzw. Trab Flugphasen existieren, bei den statisch stabilen Gangarten Gehen bzw. Schritt hingegen nicht. Zur eindeutigen Definition muss also die Existenz und Dauer einer Flugphase, oder die Dauer der Kontaktphasen prozentual zur zeitlichen Schrittlänge betrachtet werden [38]. Im vierbeinigen Fall bezieht sich dieser Kennwert auf die Hinterbeine. Mit einer solchen Kennzahl ließe sich das zweibeinige

⁶ nach William Froude 1810-1879

Gangart	Dauer Hinterbeinkontakt	Lateraler Versatz
Schritt	77%	31%
Trab	43%	55%
Gallop	36%	39%

Tabelle 2.: Kennzahlen zur Einordnung von vierbeinigen Gangarten

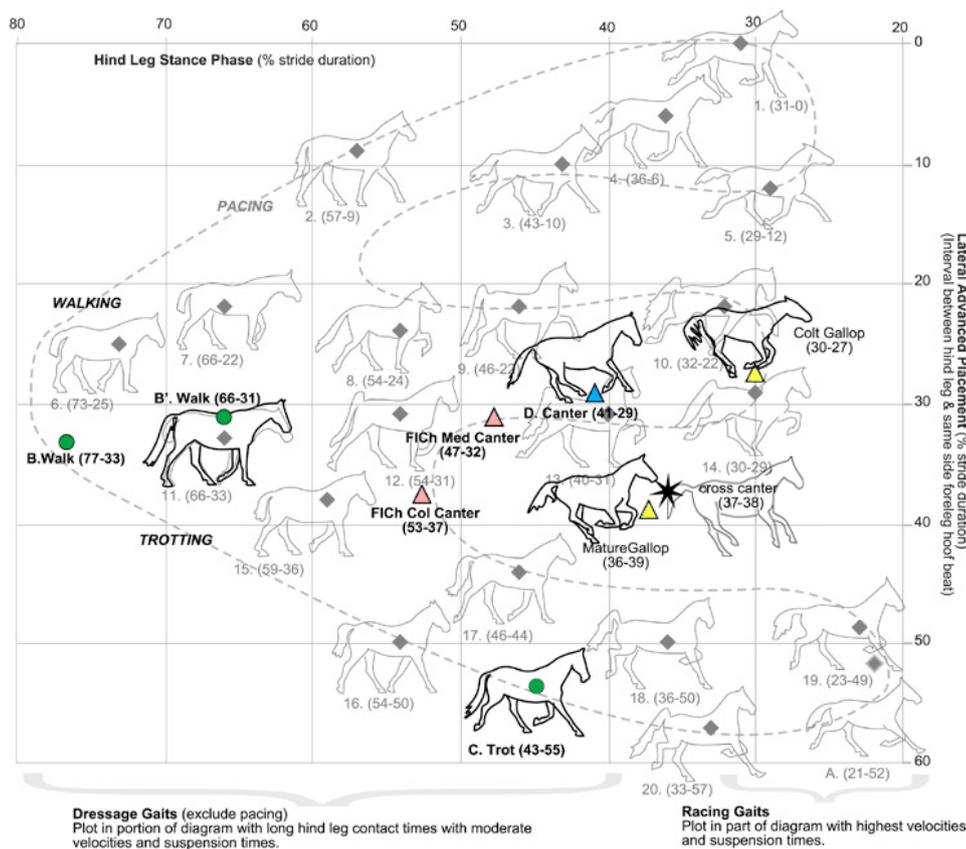


Abbildung 2.: Gangarten eines Vierbeiners [39]

Gehen vollständig und eindeutig zuordnen. Bei der vierbeinigen Fortbewegung muss allerdings noch der Versatz der Beine einer Seite zueinander, wiederum prozentual bezogen auf die zeitliche Schrittlänge, betrachtet werden [38]. Laufen die Beine einer Seite beispielsweise absolut synchron, liegt dieser laterale Versatz bei 0%. In Tabelle 2 sind die Kennzahlen für die drei natürlichen Gangarten eines Vierbeiners aufgetragen. Erkennbar ist, dass bei den Gangarten Trab und Gallop, die Dauer des Hinterbeinkontaktes jeweils unter 50% der gesamten Schrittdauer liegt und somit eine Flugphase existieren muss. Außerdem ist der Trab mit 55% lateralem Versatz nahezu perfekt gegenläufig synchron, d.h. ein hinterer Fuß tritt gleichzeitig mit dem gegenüberliegenden vorderen Fuß auf.

Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Gangarten eines Pferdes in einem Graphen. Entlang der Abszisse ist hierbei die prozentuale Hinterbeinkontaktdauer und entlang der Ordinate der prozentuale laterale Versatz aufgetragen. Die Abbildung zeigt auch, dass die verschiedenen Gang-

arten nahezu ein kontinuierliches Feld darstellen in dem nicht immer zwischen zwei diskret voneinander getrennten Gangarten unterschieden werden kann.

2.3 Variable Federsteifigkeit

In der Natur spielt zum Erreichen verschiedener Gangarten unter anderem die Variation der Federsteifigkeit eine große Rolle⁷. Das biologische Bein löst dies durch eine redundante Anordnung mehrerer Muskelgruppen mit verschiedenen Federsteifigkeiten. Hier kann für jeden speziellen Einsatz das jeweils geeignete Antriebsmodul mit der passenden Steifigkeit genutzt werden. Technisch ließe sich ein solcher Ansatz durch die Anbringung mehrerer paralleler Federelemente realisieren. Ähnlich wie in der Natur könnte so nicht nur auf das Element mit der jeweils passenden Steifigkeit zurückgegriffen werden, sondern es könnten auch weitere Steifigkeiten durch Kombination aus den vorhandenen verbauten Elementen erzielen. Ein solcher Aufbau ist allerdings durch die verschiedenen parallelen Antriebe und Federn sehr schwer und benötigt dazu relativ viel Bauraum. Außerdem lassen sich durch die Kombination der verbauten Federn zwar einige verschiedene Steifigkeiten erreichen, jedoch nicht der idealerweise gewünschte stetige Verlauf. Dieser Ansatz ist daher für das vorliegende Modell nicht geeignet.

Einen weiteren Ansatz liefert Wolf in [40]. Hier wird die Federsteifigkeit durch die Vorspannung der verbauten Feder erreicht. Die Anzahl der Antriebsmodule wird pro benötigtem Antriebsmodul mit variabler Federsteifigkeit auf zwei reduziert. Zudem kann nun auf einen stetigen Verlauf der Federsteifigkeit zurückgegriffen werden. Hinderlich an diesem Ansatz ist allerdings wiederum das hohe Gewicht und der benötigte Platz. Außerdem arbeitet dieses System zu langsam für einen Einsatz in einem Laufroboter. Einen ähnlichen Ansatz bietet auch MACCEPA der Universität Brüssel [41], was speziell für den Einsatz in Laufrobotern entwickelt wurde. Ohne einen Stellmotor kommt die manuell verstellbare Feder mit Namen Jackspring aus [42]. Der Nachteil hier ist allerdings, dass eine Änderung der Steifigkeit während des autonomen Betriebs des Modells unmöglich ist.

Eine Möglichkeit die Wirkung eines elastischen Antriebs ohne echte elastische Elemente zu erzielen bietet das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt über die admittance control [43]. Für einen solchen Ansatz muss allerdings zum Einen eine Regelung und zum Anderen genaue Kenntnis über das Modell in Form eines inversen kinematischen Modells vorliegen. Aus diesen Daten kann die Reaktion des entsprechenden Bauteils auf eine Beanspruchung berechnet und umgesetzt werden.

Eine weitere Möglichkeit ist die variable Ansteuerung der Gelenke ohne die anliegende Kraft über Sensoren zu messen, wie sie in dem vorliegenden Modell zum Einsatz kommt. Über eine solche emulierte Federsteifigkeit wird die Bewegung des Gelenks anhand der Vorgabe von wenigen Parametern und unter Einbeziehung der Zeitverzögerung durch die elastischen An-

⁷ Siehe hierzu Kapitel 3.3.3

triebsmodule berechnet und ausgeführt. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass kein zusätzlicher Motor oder ein sonstiges zusätzliches Bauteil benötigt wird. Dadurch dass die Federsteifigkeit nicht tatsächlich geändert wird, ist zudem die Stabilität bei niedriger emulierter Federsteifigkeit höher als bei niedriger tatsächlicher Federsteifigkeit⁸.

2.4 Biologisch inspirierte Werkstoffe und Antriebe

2.4.1 Künstliche Knochen

Biologische Knochen sind ein Musterbeispiel des Leichtbaus. Im Grunde genommen bestehen sie aus einem Faser-Verbund-Werkstoff, wie er auch im Bootsbau oder Flugzeugbau verwendet wird. Im Falle des Knochens handelt es sich um Collagenfasern und ein Calcium-Matrixmaterial. Ein Faser-Matrix-Verbundwerkstoff ist besonders stabil und leicht, außerdem lassen sich je nach Beeinflussung die Faserschichtdicken sowie die Faserrichtungen frei wählen, um ein optimal angepasstes Material zu erhalten. Der Knochen geht noch einen Schritt weiter und passt während des Betriebes nicht nur die Schichtdicken und Faserrichtungen an die Beanspruchungen an, sondern auch die Faserverläufe. Die Kräftelinien⁹ setzen sich sogar über Gelenke hinfort um eine optimale Anpassung des Gesamtsystems an die auftretenden Belastungen zu garantieren [44].

Die Struktur eines Knochens selbst ist gekennzeichnet durch den schalenartigen Aufbau. Lange Knochen, wie beispielsweise der Oberschenkelknochen, sind zudem nur außen hart und innen mit einem schwammartigen Aufbau feiner Knochenbalken durchzogen [45].

Einen Ansatz zur Reproduzierung des Knochens bietet das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung. Die erforderliche Struktur wird mit Hilfe eines FEM¹⁰-Verfahrens am Computer berechnet und mit Rapid-Prototyping, einem Verfahren mit dem einfach und schnell dreidimensionale Modelle in einem 3D-Drucker erzeugt werden können, produziert [46]. Das Problem dieses Verfahrens sind zum Einen die hohen Kosten. Zum Andern ist die tatsächliche Tragkraft eines solchen künstlichen Knochens, der eines gewachsenen deutlich unterlegen. Eine Faser vereint weit mehr Eigenschaften, die zur Festigkeit beitragen als die reine Geometrie [47].

Eine günstigere und durch den Einsatz von Fasern bionischere Methode stellt die Konstruktion des Bauteils aus einem gewöhnlichen Faser-Kunststoff-Verbund dar. Die Möglichkeiten bei der Materialauswahl für einen solchen Werkstoff sind enorm groß und können optimal an die Bedürfnisse angepasst werden. Außerdem können ähnlich wie in einem biologischen Knochen die Faserschichtdicken und die Faserrichtungen an die Kräfteverläufe grob angepasst werden,

⁸ Siehe hierzu Kapitel 4.4

⁹ Kräftelinien zeigen den Verlauf der durch ein Feld verursachten Kraft auf einen Körper an

¹⁰ Finite Elemente Methode - Ein Verfahren was unter anderem zur Spannungsberechnung eingesetzt wird

um eine möglichst große Materialeinsparung zu erreichen [47].

Eine weitere Möglichkeit den Aufbau eines Knochens als bionische Struktur nachzuahmen, ist der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen und von konstruktivem Leichtbau. Zu den Leichtbauwerkstoffen zählen besonders leichte und trotzdem steife Werkstoffe wie zum Beispiel Titan oder Aluminium. Konstruiert man mit einem solchen hochfesten Werkstoff, lässt sich Material einsparen und ein Gewichtsverlust des Gesamtsystems beobachten. Der konstruktive Leichtbau zielt ebenfalls auf die Einsparung von Material, allerdings durch das Hinzufügen baulicher Merkmale die zur Steifigkeit beitragen oder das Weglassen von Material an Bereichen mit geringer oder keiner Beanspruchung. Eine solche Möglichkeit besteht immer und bedarf nur der sorgfältigen Beachtung und Berechnung der Belastungen [48].

In den Konstruktionsplänen des in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Modells werden sowohl Prinzipien aus dem konstruktiven Leichtbau, etwa im Einsatz von dünnwandigen Rohren als Beinglieder, als auch aus dem Leichtbau durch Leichtbauwerkstoffe verwendet.

2.4.2 Künstliche Muskeln

Für jegliche Bewegung eines Lebewesens verantwortlich sind dessen Muskeln. Muskeln sind fest mit dem Skelett verbunden und bewegen dieses durch gezielte Kontraktion. Eine Dehnung kann ein Muskel nur passiv ausführen, weshalb Muskeln immer in antagonistisch wirkenden Paaren auftreten. Die Kontraktion des Muskels selbst geschieht durch eine Änderung der chemischen Konzentration, wodurch sich durch eine „Ruderbewegung“ genannte Operation die einzelnen Fasern und somit der gesamte Muskel verkürzt. Endet das auslösende Nervensignal, erschlafft der betreffende Muskel, was Relaxation genannt wird [45].

In der Bionik gibt es viele interessante Ansätze, um ein solches Verfahren zu kopieren. Einige werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Einen Ansatz bietet die Firma Festo mit dem „Fluidic Muscle“. Es handelt sich hierbei um einen faserverstärkten, mit Luft oder Flüssigkeit befüllbaren Schlauch, der unter Innendruck eine Kontraktion zeigt. Dies führt wiederum zu einer Zugkraft in Längsrichtung des Bauteils. Die Vorteile eines solchen „Fluidic Muscle“ sind die leichte Bauweise, die Ruckfreiheit, die Elastizität und das sehr hohe Kraft/Gewicht-Verhältnis [49, 50]. Problematisch ist hierbei allerdings, dass bei einem autonomen Gebrauch ein Kompressor zur Erzeugung des erforderlichen Drucks mitgeführt werden muss.

Sehr ähnlich zu einem realen Muskel verhalten sich außerdem elektroaktive Polymere. Es handelt sich hierbei um einen Kunststoff, der sich unter einer elektrischen Spannung zusammenzieht. Diese Technik kann in einem mechanischen Aktuator verwendet werden und bietet ähnliche Vorteile wie der „Fluidic Muscle“. Die Forschung auf dem Gebiet der elektroaktiven

Polymere ist noch sehr jung aber mit Blick auf die Zukunft sicherlich vielversprechend für den Einsatz als künstliche Muskeln. Momentan ist allerdings die Kraftentwicklung noch zu gering, um die benötigten Bewegungen durchzuführen [51].

In diesem Kontext ebenfalls interessant, jedoch leider nicht als Muskelerersatz einsetzbar sind die Piezoelektrische Keramik und die Formgedächtnis-Legierung. Die Piezoelektrische Keramik, kurz Piezokeramik, ist ein Werkstoff, der unter elektrischer Spannung seine Form ändern kann¹¹. Dies geschieht äußerst schnell im Bereich von Mikrosekunden. Nicht einsetzbar ist die Piezokeramik allerdings wegen fehlender Elastizität und der hohen Dichte von bis zu 8g/cm^3 . Bei der Formgedächtnis-Legierung handelt es sich um einen thermomechanischen Werkstoff, der bei Erhitzung in eine zuvor definierte Form springt. Lässt man ihn erkalten, verformt er sich in den Ausgangszustand. Diese Anregungsweise macht die Formgedächtnis-Legierung äußerst träge und damit ungeeignet für den Einsatz als künstlichen Muskel [51].

Die wohl einfachste Methode des Antriebs lässt sich mit speziellen Elektromotoren, sogenannten Servos realisieren. Ein Beispiel für einen solchen Elektromotor ist der Dynamixel AX-12 der Firma Robotis [52]. Mit Hilfe dieses Gerätes kann bei frei konfigurierbarer Kraft bzw. Geschwindigkeit eine Achse zu einer Position gedreht werden, die sich innerhalb eines 300° Radius befindet. Diese Bewegung kann nicht nur äußerst schnell geschehen, sondern sie ist dabei auch bis auf nur $0,3^\circ$ exakt. Weitere Vorteile sind die Rückmeldung der Parameter Winkel, Winkelgeschwindigkeit und anliegende Torsionskraft. Außerdem lässt sich der Dynamixel einfach programmieren und modular verbauen. Nachteilig ist die fehlende Elastizität.

Abhilfe schafft der in der vorliegenden Arbeit benutzte Ansatz, einen mit Federn bestückten Seilzug der zwischen Aktuator und zu bewegendem Bauteil angebracht wird zu verwenden [53, 54].

2.5 Simulationsbasierte Entwicklung

Der Begriff „Simulationsbasierte Entwicklung“ beschreibt eine Vorgehensweise in der modernen, computergestützten Produktentwicklung. Betrachtet man die Konstruktionsphasen nach den VDI-Richtlinien 2210 und 2221 kann die simulationsbasierte Entwicklung vor allem in den ersten Phasen, also der Funktionsfindung und der Prinzipiarbeit eingesetzt werden. Aber auch ein Einsatz im nächsten Schritt der Konstruktion, in der Gestaltung, wie er in der vorliegenden Arbeit hauptsächlich behandelt wird, ist sinnvoll und üblich.

Simulationsbasierte Entwicklung ist dabei ein Oberbegriff, der alle Simulationsschritte, die im Konstruktionsprozess verwendet werden, zusammenfasst. In den Phasen Funktionsfindung und Prinzipiarbeit, die sich als Produktkonzeption zusammenfassen lassen, kommt die Simulation beispielsweise bei der Entwicklung physikalischer Funktionsstrukturen oder auch logischer

¹¹ i.e. inverser piezoelektrischer Effekt

Funktionsstrukturen zum Einsatz. Im Konstruktionsschritt der Gestaltung finden Simulationen als Mehrkörpersimulationen oder auch Festigkeitsanalysen über FEM Anwendung [55].

Die Simulation dient vornehmlich der Beschleunigung des Entwicklungsprozesses, wird allerdings auch in allen anderen Bereichen des Produktlebenszyklus verwendet. Alle gesammelten Produktdaten erleichtern so nicht nur die Entwicklung, sondern damit einhergehend auch beispielsweise die Fertigung, die Wartung und das Recycling eines Produktes [55].

3 Modellierung

3.1 MATLAB Simulink

MATLAB Simulink ist ein Programmteil der Berechnungssoftware MATLAB vom Hersteller TheMathWorks Inc. und dient zur Modellierung komplexer Systeme. Über die Kombination verschiedener im Programm verfügbarer oder sogar selbst programmierbarer Module können neben beispielsweise physikalischen oder informationstechnischen Systemen auch kombinierte Systeme erstellt werden. Ein Beispiel für ein derart kombiniertes System ist das auf den folgenden Seiten dargestellte physikalische Modell eines Laufroboters und dessen integrierte Steuerung.

Diese beliebige Kombinier- und Erweiterbarkeit der Systemmodule ist die besondere Stärke der Software und ermöglicht einen universellen und schnellen Einsatz. Eine Ausgabe in C-Quellcode ist ebenfalls möglich, was eine schnelle Berechnung des Projekts oder sogar eine externe Optimierung ermöglicht.

3.2 Modellfindung

Die Entwicklung des Modells begann mit der genauen Untersuchung des biologischen Vorbildes. Dazu wurden Photographien von Skelettansichten verschiedener Hunde und Pferde in unterschiedlichen Positionen abstrahiert und vermessen. Ein Beispiel für eine Abstraktion von Hinterbeinknochen ist in Abbildung 3 links dargestellt. Es ist erkennbar, dass die geschwungene optimierte Form der Knochen zu einer einfacher zu berechnenden Linie abstrahiert ist. Gemessen werden die Längen der Knochen, die Schulterhöhen und die Winkel zwischen den Knochen in verschiedenen Laufpositionen ausgewählter Gangarten.

Die Ergebnisse aus den Messungen wurden analysiert und ausgewertet. Resultat aus dieser ersten Auswertung ist vor allem die in Abschnitt 3.3.3 noch näher beschriebene Tatsache, dass es prinzipiell zwei eingeprägte Winkel pro Gelenk gibt, zwischen denen die aktuelle Position des Gelenks rotiert. Mit Hilfe der gewonnenen Daten wurde ein erstes zweidimensionales Modell erstellt. Dieses Modell beinhaltet nur ein Bein, welches zudem für schnellere Berechenbarkeit überdimensioniert und äußerst leicht ist. Es besitzt außerdem nur abstrahierte Trägheiten und ist voll aktuiert.

An diesem einfachen Modell konnte schnell ein geeigneter Bewegungsablauf und die passende Steuerung entwickelt werden. Die Ansteuerung der Gelenke konnte außerdem auf verschiedene unteraktuierte Modelle übertragen werden. Abbildung 18 in Kapitel 4 zeigt exemplarisch vier dieser Beinkinematiken.

Der nächste Schritt in der Entwicklung des Modells war das Hinzufügen eines zweiten Beines und der passenden Bodenkontakte. Das entstandene Modell ist immer noch zweidimensional: es kann nicht zur Seite kippen. Das zweite Bein ist eine Kopie des ersten und über ein abstrahiertes Rückgrat, einen Stab, am obersten Gelenk mit dem ersten Bein verbunden. An diesem Modell wurden erste Analysen zu Gangarten und zur Stabilität durchgeführt.

Darauf wurden die zwei einzelnen Beine zu Beinpaaren komplettiert. Mit Hilfe des nun vorliegenden Modells konnte die Ansteuerung der Beine zum Erreichen der Gangarten entwickelt werden. Nur durch das Ändern der Randbedingungen von drei auf sechs DOF konnte aus diesem Modell das erste dreidimensionale Modell erstellt werden. An dem nun vorliegenden Modell konnten unter anderem auch Untersuchungen zur Detaillierung des Vorderbeinaufbaus durchgeführt werden. Das mit besser approximierten Trägheiten und auf gewünschte Größe skalierte Modell diente als Grundlage für die Optimierungen und für die 3D-CAD Konstruktion. Die Ergebnisse aus der Optimierung und die Massen und Trägheiten aus dem 3D-CAD-Modell sind in das finale, in den folgenden Abschnitten beschriebene Modell bereits integriert.

3.3 Aufbau des Modells

Grundlegend lässt sich der Aufbau des Modells in die drei Teilbereiche tragende Struktur, Antriebe einschließlich der Gelenke und Steuerung unterteilen. Übertragen auf ein Lebewesen ergäben sich die Bezeichnungen Knochengerüst, Muskeln und Gehirn einschließlich Teile des Rückenmarks, wobei die Gelenke hier nicht zu den Muskeln sondern zum Knochengerüst gezählt werden. Auch in Anbetracht der Verwirklichung eines physischen Robotermodells ist eine solche Strukturierung sinnvoll, da hier unterschieden wird zwischen starren Objekten - der tragenden Struktur, beweglichen Objekten - den Antrieben und Gelenken und dem Software-Anteil, der Steuerung. Die Vorteile dieser Unterteilung sind die unabhängige Entwicklung der verschiedenen Teilbereiche, die direkte Übertragbarkeit auf die Konstruktion und die vereinfachte Optimierung; beispielsweise der starren Struktur auf ein minimales Gewicht.

3.3.1 Struktureller Aufbau

Das Modell besteht aus starren Stäben an deren Enden sich jeweils Anschlussstücke befinden. Diese Anschlussstücke sind entweder Scharniergelenke oder Bodenkontaktpunkte. Jedes der vier Beine des Modells besteht aus drei Gliedern, drei Gelenken und einem Bodenkontaktpunkt, wobei zunächst auf die beiden Vorderbeine eingegangen werden soll. Besonderheit aller Beine ist, dass nicht jedes der drei Gelenke durch ein Antriebsmodul angetrieben wird, sondern nur zwei Gelenke pro Bein. Angetrieben werden das oberste Gelenk, die Hüfte, und das mittlere Gelenk, das Knie. Das distale¹² Gelenk, der Knöchel, wird hingegen nur passiv, durch eine geschlossene kinematische Kette genannt Pantograph, bewegt.

¹² distal (lat. distare „sich entfernen“): vom Körperzentrum entfernt gelegen oder verlaufend

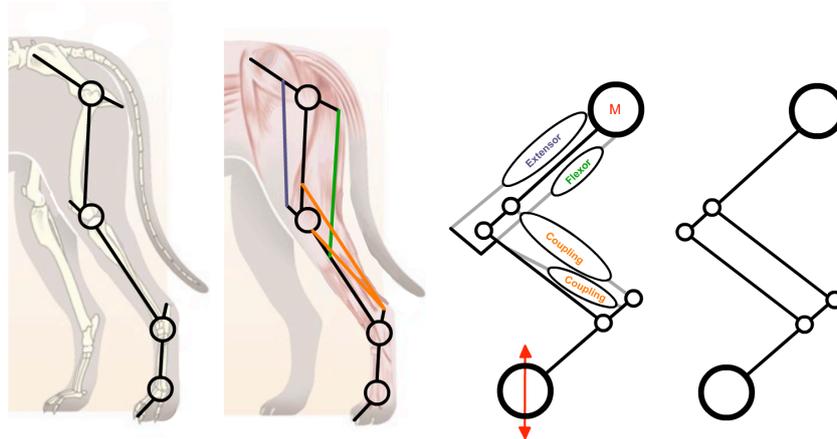


Abbildung 3.: Abstraktion eines Schäferhund-Hinterbeines

Pantograph-Mechanismus

Abstrahiert man das Hinterbein eines Hundes auf wenige Knochen, Muskeln und Sehnen erhält man die in Abbildung 3 links und mitte links dargestellten Strukturen. Die Knochen sind hierbei schwarz eingetragen, die Sehnen orange und die Muskeln in blau und grün. Zu beachten ist, dass ein Schäferhund technisch gesehen über ein vollständig aktuiertes Hinterbein verfügt und die gezeigte Sehnenkonstruktion nicht alleine für die Bewegung der unteren Glieder verantwortlich sind. Dennoch muss im Sinne der Bionik der Einsatz einer solchen Technik sinnvoll sein. Das Pantographenbein dient in der Natur vor allem der Entkopplung von Antrieb und tragender Struktur [56], also der Minimierung der auf Knochen wirkenden Biegebeanspruchung mit Hilfe von Zuggurtung, einer auch im Leichtbau eingesetzten Technik.

Nach weiterer Abstraktion und Ersetzung der Sehnen durch einen starren Stab erhält man den in Abbildung 3 rechts dargestellten Pantographen. Im Gegensatz zu einem starren Stab sind Sehnen elastisch und nur auf Zug belastbar. Ein Verzicht auf die Sehnen bedeutet von daher das Einbüßen der Elastizität gegenüber dem biologischen Vorbild. Außerdem wird dem so bewegten Glied seine Position exakt durch das angrenzende Glied diktiert, da durch die Änderung der verbleibende DOF entfernt wurde. In Abbildung 4 sind die Bewegungen der Fußpunkte eines vollständig aktuierten Beines und eines mit Pantographen bewegten Beines jeweils für mehrere Schritte auf eine zwei-dimensionale Ebene projiziert dargestellt. Die Beine sind jeweils mit dem Hüftgelenk an ein Festlager verbunden. Um die Bewegungen zu vergleichen wurde ausschließlich der Antrieb des distalen Gelenks entfernt und durch einen Pantographen ersetzt (Siehe: Abbildung 3), außerdem liegt abgesehen von der Schwerkraft keine Belastung vor. Sowohl die Dimensionen als auch die Antriebsmuster stimmen überein. Es ist zu erkennen, dass schon ohne jegliche Anpassung oder Optimierung der Steuerung an die neue Kinematik die Bewegungsmuster sich nur geringfügig unterscheiden. Vergleicht man des weiteren die Winkelgeschwindigkeiten des jeweils vollaktuierten sowie unteraktuierten Knies und Knöchels, dargestellt in Abbildung 5, so zeigt sich einerseits, wie erwartet eine geringe Abwei-

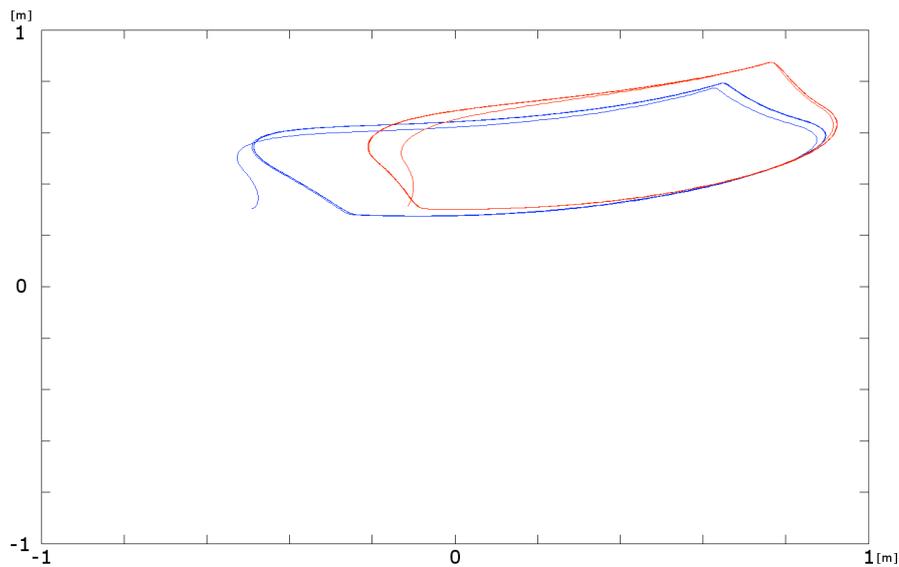


Abbildung 4.: Vergleich der Position von vollaktuiertem mit unteraktuiertem Bein während einer Bewegung. Blau: Bewegung des Fußpunktes eines vollaktuierten Beines, rot: Bewegung des Fußpunktes eines mit Pantographenstruktur bewegten, unteraktuierten Beines

chung der Geschwindigkeit im passiv angetriebenen Knöchel, andererseits jedoch auch eine geringe Abweichung der Geschwindigkeit im Knie. Dies ist zurückzuführen auf die Gewichtsänderung, die durch das Hinzufügen eines weiteren Stabes für den Pantographen entstanden ist. Betrachtet man allerdings das gesamte System, reduziert sich das globale Gewicht durch die Einsparung eines Antriebsmoduls pro Bein. Außerdem erhöht sich durch einen geringeren Energieverbrauch die Reichweite des Roboters.

Der hier zum Vergleich herangezogene Bewegungsablauf eines vollaktuierten Beines ist dem eines Tieres grundsätzlich nachempfunden. In Abbildung 6 sind die gemessenen Winkel der betrachteten Gelenke eines Hinterbeines und die tatsächlich erreichten Winkel des vollaktuierten Modells dargestellt. Die gemessenen Werte stammen dabei aus einer Bewegungsstudie eines sich im Trab befindlichen Pferdes. Trotz der erkennbaren Abweichungen aufgrund der Interpolation und der fehlenden Belastung im simulierten Fall, lässt sich die grundlegende Ähnlichkeit der Bewegungen bereits ablesen.

Zur Befestigung des für den Pantographen zusätzlich eingefügten Stabes ist anzumerken, dass ebendieser nicht durch einfache Scharniergelenke modelliert ist. Um mechanische Redundanz, also die mehrfache Reduktion desselben DOF, zu vermeiden, wurde eines der beiden neu eingefügten Gelenke als Kugelgelenk und das andere als Drehschubgelenk eingefügt.

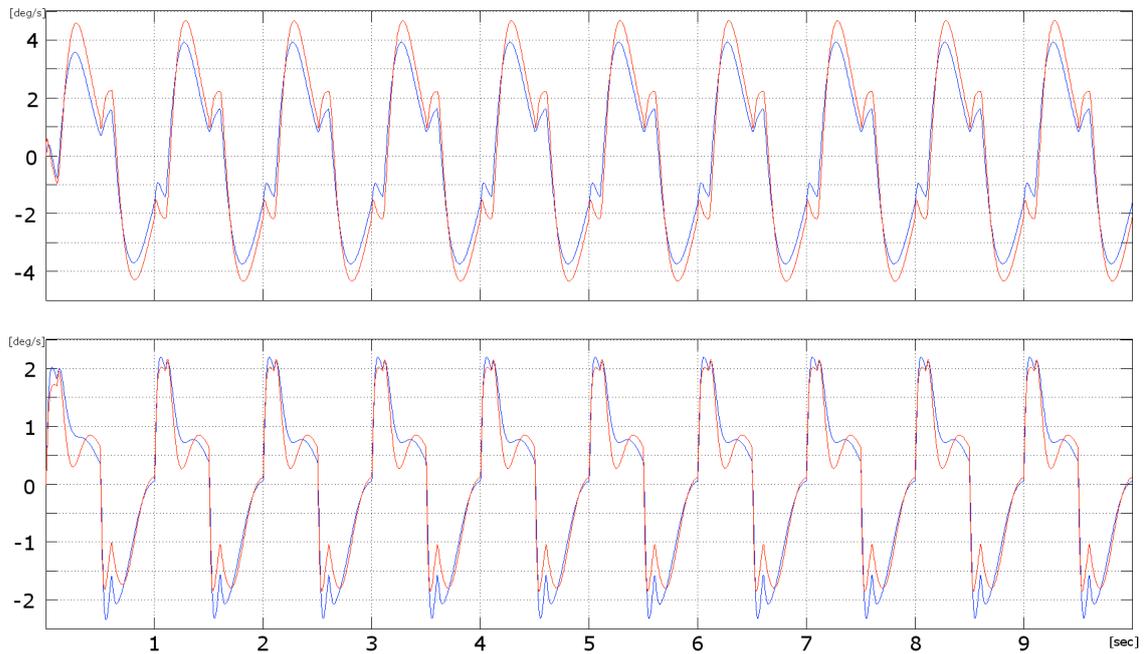


Abbildung 5.: Vergleich der Winkelgeschwindigkeit von vollaktuiertem mit unteraktuiertem Bein während einer Bewegung. oben: Knie, unten: Knöchel, blau: Geschwindigkeit des vollaktuierten Gelenks, rot: Geschwindigkeit des unteraktuierten Gelenks

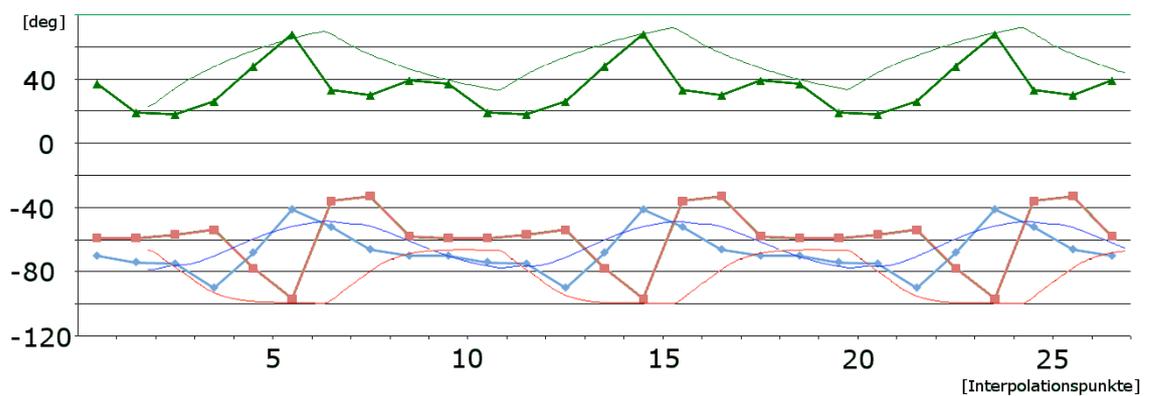


Abbildung 6.: Vergleich des gemessenen mit dem Simulierten Bewegungsablauf. Der simulierte Bewegungsablauf ist dabei als dünne, durchgehende Linie dargestellt. Verglichen werden die Winkel der Hüfte (blau), des Knies (rot) und des Knöchels (gelb).

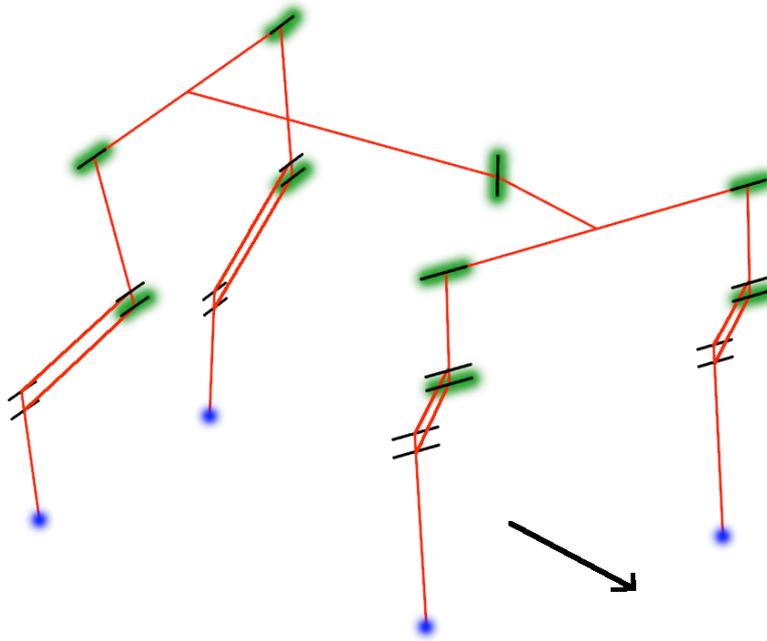


Abbildung 7.: Struktureller Aufbau des Modells. Gelenke sind durch ihre jeweilige schwarze dargestellte Rotationsachse zu erkennen. Angetriebene Gelenke sind grün hinterlegt. Der Pfeil markiert die Laufrichtung, die Bodenkontakte sind blau dargestellt.

Vorderbeine

Der generelle Aufbau der Vorderbeine gleicht dem der Hinterbeine. Der prinzipielle Unterschied wird erst beim Vergleich des Modells mit seinem biologischen Vorbild deutlich. In Abbildung 8 ist das Knochengestüt eines Hundes der Rasse Thailand Ridgeback in einer Laufposition dargestellt. Zu erkennen ist, dass die farblich gleich markierten Knochen der jeweils schräg gegenüber liegenden Vorder- und Hinterbeine sich in paralleler Position befinden, sich also gleichförmig bewegen. Auffällig ist hierbei eine Verschiebung des gesamten strukturellen Aufbaus um eine Ebene nach „oben“. Die in Abbildung 8 eingezeichnete rote Linie zeigt die Lage der Drehpunkte der obersten Rotationsbewegung an.

Für das Modell ergibt sich daraus ein identischer Bewegungsablauf der Vorder- und Hinterbeine, mit der Einschränkung auf das distale Glied, den Vorderfuß zu verzichten, dafür aber proximal¹³ ein Neues, das Schlüsselbein einzufügen. Einen weiteren Einfluss hat diese Änderung auf die Längen der jeweiligen Glieder. Sind beim Hinterbein alle Glieder in etwa gleich lang, haben sie beim Vorderbein unterschiedliche Längen. Das Längenverhältnis der Glieder Schlüsselbein zu Oberarm zu Unterarm unterscheidet sich von Rasse zu Rasse, liegt aber sowohl beim Schäferhund, als auch beim in Abbildung 8 dargestellten Thailand Ridgeback bei etwa 1:1:2.

¹³ proximal (lat. proximus „der Nächste“): zum Körperzentrum hin gelegen oder verlaufend

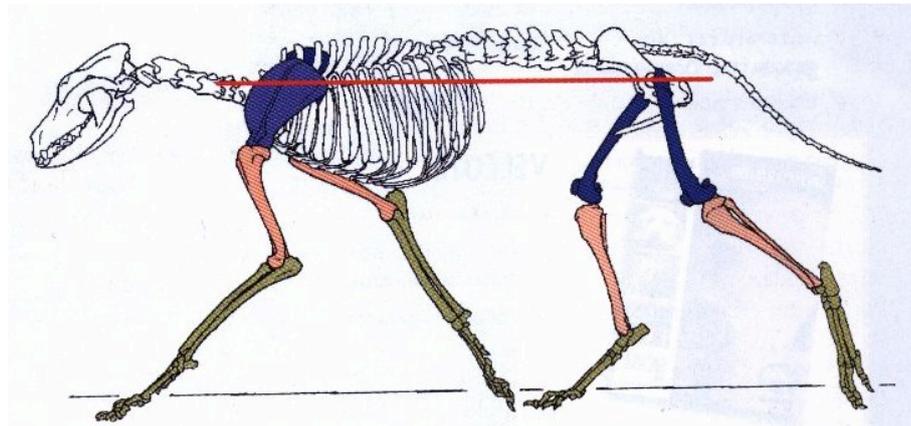


Abbildung 8.: Gangbild eines Thailand Ridgeback

Lenkung

Die Bewegung des Modells im Raum wird durch ein weiteres Scharniergelenk ermöglicht. Das Gelenk befindet sich in der Verbindungsachse zwischen den Vorder- und Hinterbeinen und erlaubt eine Drehung um die Z-Achse (Höhenachse). Eine koordinierte Richtungsänderung ist über dieses Gelenk möglich, ohne den Komplexitätsgrad der zwei-dimensionalen Antriebsstrukturen in den Beinen weiter zu erhöhen. Eine genaue Anordnung der Gelenke des gesamten Modells ist in Abbildung 7 dargestellt. Angetrieben wird die Lenkung durch einen elastischen Antrieb, wie er im nächsten Abschnitt erläutert wird.

3.3.2 Elastischer Antrieb

Der Antrieb des Modells erfolgt durch in ihrer Wirkung muskelähnliche Antriebsmodule, welche sich in Motor, Kraftübertragung und Wirkungspunkt gliedern lassen. Als Motor wird ein Dynamixel RX-64 der Firma Robotis verwendet [57]. Diesem Gerät lässt sich ein Winkel über die Steuerung vorgeben, welcher mit $0,157 \text{ sec}/60^\circ$ äußerst schnell erreicht wird. Der Motor hat ein Gewicht von 116g. Der Antrieb über einen solchen Aufbau ist bereits im Verbundprojekt BioRob der Technischen Universität Darmstadt erfolgreich erprobt worden [53, 54].

Um die für die muskelähnliche Betriebsweise benötigte Elastizität zu erreichen, ist der Motor nicht direkt mit dem relevanten Gelenk verbunden, sondern überträgt seine Kraft über elastische Seilzüge auf den zu bewegenden Stab. Alternativ kann auch ein mit einer Feder bestückter starrer Seilzug verbaut werden. Vergleichbar mit einem Muskel wirkt die Kraft über eine Zuggurtung auf den Stab. Prinzipiell ist diese Art der Kraftübertragung ebenfalls eine Pantographenkonstruktion, hier sogar mit Elementen, die wie Sehnen auch nur Zugkräfte übertragen. Um das jeweilige Glied trotzdem in beide Richtungen aktiv bewegen zu können, wird wie auch beim biologischen Vorbild ein Antagonist¹⁴ eingefügt. Konstruktiv sind Agonist und Antago-

¹⁴ Antagonist: der Gegenspieler eines anderen Muskels (Agonist)

nist ein einziges Bauteil, das über eine Umlenkrolle verläuft, die vom Motor gedreht wird. Die jeweiligen Enden der Seilzüge sind am Kraftangriffspunkt mit dem Stab verbunden. Durch diesen Aufbau lassen sich zwar im Gegensatz zur Natur Agonist und Antagonist nicht unabhängig voneinander bewegen, trotzdem kann durch ein solches Gegenspielerprinzip die gewünschte elastische Bewegung erzeugt werden.

3.3.3 Steuerung des Modells

Zunächst ist anzumerken, dass das Modell alleine durch eine Steuerung bewegt wird, also für die getesteten Fälle keine Art von Rückmeldung der jeweiligen Komponenten benötigt.

Die Steuerung ist geteilt in einen zentralen und je einen dezentralen Teil pro Bein. Der Vorteil eines solchen Aufbaus ist zum Einen die möglichst genaue Orientierung am biologischen Vorbild, zum Anderen die gesteigerte Modularität.

Bionische Steuerung

Ein Teil der Bewegung eines Tieres oder auch eines Menschen wird bewusst gesteuert, ein anderer Teil geschieht im Unterbewusstsein. Während der Fortbewegung regelt das Lebewesen verschiedene Parameter wie zum Beispiel die Geschwindigkeit bewusst, die eigentlichen mechanischen Prozeduren des Fortbewegens laufen jedoch ganz und gar unterbewusst ab. Dieses Prinzip der Steuerung wurde auf das Modell übertragen. Im zentralen Element der Steuerung befindet sich der bewusste Teil, im dezentralen der unbewusste.

Das zentrale Steuerungsorgan ist ein Mustergenerator, ein Central Pattern Generator [58] der abhängig von drei verschiedenen Parametern eine zeitliche Signalfolge für jedes Bein ausgibt. Diese Parameter symbolisieren dabei die aktiven, bewusst variierbaren Komponenten beim Gang eines Lebewesens. Da das Ziel des Roboters auch die Fortbewegung in verschiedenen Gangarten ist, wird hier direkter Bezug auf die in Kapitel 2.2 beschriebenen Kennzahlen zur Definition der Gangarten eines Vierbeiners genommen.

Logisch wäre die Variation der Parameter Geschwindigkeit und Gangart, also lateraler Versatz und Dauer der Flugphase. Bedenkt man allerdings, dass der Roboter über keine Art der Rückmeldung verfügt und sowohl die Geschwindigkeit als auch die Dauer der Flugphase stark vom Untergrund abhängen, so wird offensichtlich, dass eine Steuerung über diese Parameter einer Regelung bedarf. Die verwendeten Parameter sind mit Periode, lateraler Versatz und caudaler¹⁵ Versatz umgebungsunabhängig, außerdem ließe sich eine entsprechende Regelung zur ausschließlichen Vorgabe von Geschwindigkeit und Gangart mit Hilfe dieser Parameter noch nachträglich hinzufügen. Die drei Parameter bedeuten im Einzelnen:

¹⁵ caudal (lat. cauda „Schwanz“) zum Schwanz hin, hinten

-
- **Periode:** der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Signalen eines Beines. Alle Beine haben dieselbe Frequenz.
 - **Lateraler Versatz:** der prozentuale zeitliche Versatz der auf einer Seite liegenden Beine zueinander, bezogen auf eine Schrittdauer.
 - **Caudaler Versatz:** der prozentuale zeitliche Versatz der Hinterbeine zueinander, wiederum bezogen auf eine Schrittdauer.

Jedes Bein ist direkt mit dem Mustergenerator verbunden und empfängt, beeinflusst durch die genannten Parameter eine zeitliche Abfolge kurzer Signale. Die Dauer der Bewegung eines Beines pro Schritt ist prinzipiell unabhängig, sie beträgt zur Vereinfachung allerdings die Hälfte der Dauer einer Periode.

Die Anregung der Bewegung eines Beines oder auch anderer Muskelgruppen, verläuft in der Natur ebenfalls durch ein Signal, beim Lebewesen Reiz genannt. Liegt die Reizintensität oberhalb der Rheobase¹⁶ wird das Aktionspotential ausgelöst und der entsprechende Muskel kontrahiert [59]. Ein Kupplungseffekt löst außerdem die zeitverzögerte Abfolge weiterer Muskelkontraktionen aus [58].

Das Modell greift diesen Ansatz auf. Der dezentrale zweite Teil der Steuerung sitzt, wie oben genannt im Bein selbst. Bei einem Signal wird hier der genaue zeitliche Ablauf der Gelenkwinkel gesteuert. Das Signal wird digital übertragen und somit der Schwellenwert immer erreicht.

In den Gelenken sind jeweils die Ruheposition und die Position im aktivierten Zustand gespeichert. Diese Lagen sind so definiert, dass, wenn sich alle Winkel in Ruheposition befinden, der Roboter auf allen Vieren steht. Erreicht ein Signal ein Gelenk, wird dieses über das Antriebsmodul bewegt, indem zunächst der Sollwinkel im Motor verändert wird. Diese Auslenkung ist durch die hohe Geschwindigkeit des Motors schnell erreicht und überträgt sich über die elastische Verbindung zeitverzögert auf das jeweilige Glied. Die Dauer, die benötigt wird, dass auch das entsprechende Glied die gewünschte Position erreicht, hängt von der Federsteifigkeit des elastischen Seilzuges, bzw. der verbauten Feder in der Seilverbindung des Antriebsmoduls ab.

Gelangt das Signal an das Gelenk, dreht der Motor zurück in die Ruhelage. Wiederum folgt das Glied zeitverzögert. Die proximalen Gelenke bieten allerdings eine Besonderheit. Die Betrachtung des Bewegungsablaufes eines tierischen Beines zeigt, dass das Bein aus der Standposition zuerst entgegen der Laufrichtung abgewinkelt, also das Bein ein Stück angezogen wird, bevor es nach vorne gestreckt wird. Um diese Bewegung nachvollziehen zu können, haben die proximalen Gelenke drei bekannte Zustände, zwischen denen rotiert wird.

Aus der Standphase heraus wird zunächst für eine sehr kurze Dauer der Winkel erhöht, das Oberbein schwingt also nach hinten. Nun folgen das Anwinkeln des unteren Gelenks und ei-

¹⁶ Rheobase ist die Schwellenintensität, bei der das Aktionspotential eines Muskels ausgelöst wird.

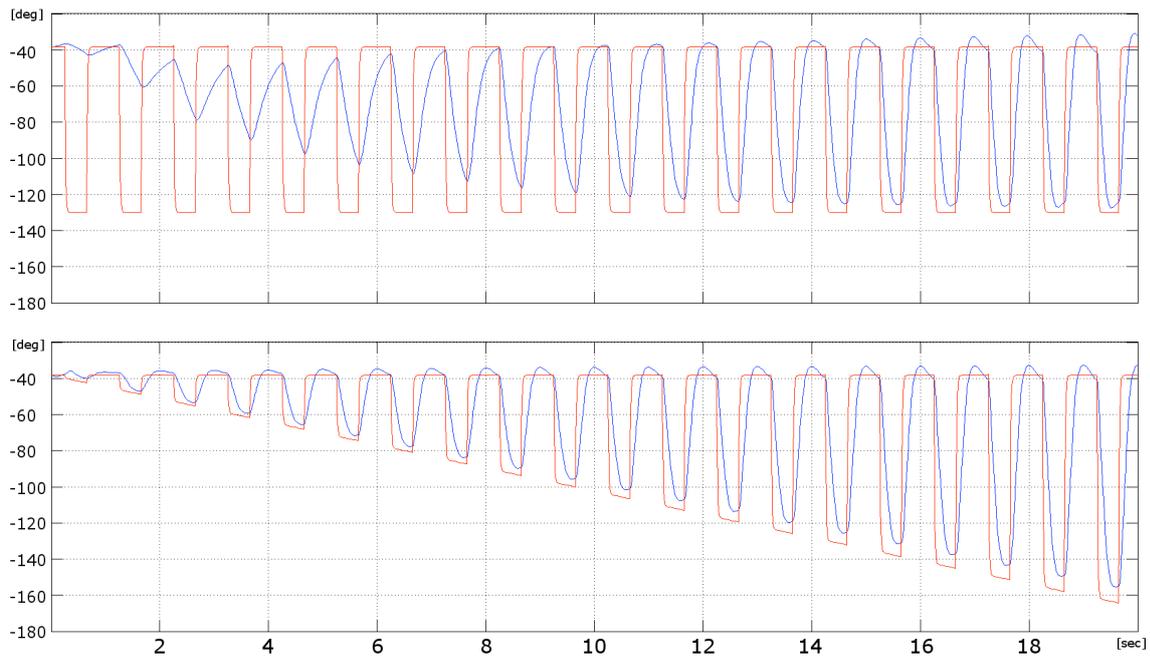


Abbildung 9.: Vergleich der Wirkweise bei tatsächlicher Änderung der Federsteifigkeit (oben) und emulierter Änderung der Federsteifigkeit (unten). Die Steifigkeit wurde linear geändert und beträgt zum Startzeitpunkt null und am Endpunkt nach 20 Sekunden 20.

ne zeitgleiche Verminderung des proximalen Gelenkwinkels für eine längere Dauer, also das Vorbewegen des Beines. Das Bein selbst führt die jeweilige Bewegung durch die elastische Verbindung zeitverzögert aus.

Emulierte Federsteifigkeit

Menschen und Tiere beeinflussen ihre Fortbewegung unter anderem durch Anpassung der in den elastischen Antrieben wirkenden Federsteifigkeiten. Verwendung finden könnte eine solche Funktion auch in dem in der vorliegenden Arbeit behandelten Modell, um beispielsweise bei einer hohen Schrittfrequenz eine weitere Streckung der Beine zu erhalten. Eine Alternative zur tatsächlichen Änderung der Federsteifigkeit ist die Änderung der Ansteuerung der Antriebe und die daraus resultierende Imitation einer tatsächlichen Variation der Steifigkeit.

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erläutert, besitzt jedes Gelenk prinzipiell zwei eingeprägte Zustände, sprich Winkel, zwischen denen es in definiertem Takt pendelt. Je nach Periodenlänge, Steifigkeit der im Antriebsmodul verbauten Feder und der Zuladung variiert das Maß der Bewegung des angetriebenen Gliedes. Abbildung 9 oben zeigt den Vergleich des Motorwinkels (rot) mit dem Winkel des angetriebenen Gelenks (blau). Während des 20 sekundigen Versuchs wurde die Federsteifigkeit der verbauten Feder linear von 0 auf 20 erhöht. Es lässt sich erkennen, dass bei niedriger Federsteifigkeit der vom Gelenk erreichte Winkel nicht an den vom Motor eingestellten Winkel heranreicht, später, bei höherer Steifigkeit diesen aber sogar über-

steigt.

Ein ähnlicher Effekt lässt sich auch durch die in Abbildung 9 unten dargestellte Herangehensweise erreichen. Wie in Abbildung 9 oben wird auch hier der vom Motor erreichte Winkel (rot) mit dem vom Gelenk erreichten Winkel (blau) verglichen. Der Unterschied hier ist jedoch, dass die tatsächlich verbaute Federsteifigkeit sich nicht im Laufe der Zeit ändert. Geändert wird im unteren Fall nur die Ansteuerung des Motors.

Zur einfacheren Handhabung des Modells und zum besseren Vergleich mit der tatsächlichen Federsteifigkeitsänderung ist das Maß der Motor-Über- oder -Untersteuerung durch einen einzigen Parameter, die **emulierte Federsteifigkeit** geregelt. In der Abbildung 9 unten wurde dieser Parameter ebenfalls linear von 0 auf 20 erhöht. Die Ähnlichkeit der resultierenden Bewegungen vor allem im relevanten Bereich von 5 bis 16 N/m ist dabei deutlich zu erkennen.

Auswirkungen auf die Fortbewegung, insbesondere auf die Änderung von Gangarten durch Variation der Federsteifigkeit und weitere Ergebnisse zur emulierten Federsteifigkeit sind in Kapitel 4.4 dargestellt.

3.4 Simulink Struktur

Um das in Kapitel 3.3 beschriebene Modell optimieren und bewerten zu können, muss ein System aus mathematischen Gleichungen erstellt werden. Zur einfacheren Handhabung und besseren Erweiterbarkeit erfolgt die Modellierung in MATLAB unter Hinzuziehung der SimMechanics-Toolbox. Diese liefert ein Repertoire an bereits definierten Gleichungen für verschiedene mechanische Elemente, gegliedert in die typischen Hauptkategorien Körper (bodies), Verbindungen (joints) und Antriebe (drivers, actuators). Dazu gibt es noch wenige weitere Kategorien, darunter die Gruppe der Sensoren.

Die Arbeit mit der SimMechanics Toolbox bringt nicht nur den Vorteil, der einfacheren Handhabung durch schnelles Erstellen komplexer Gleichungen ohne direkt mit diesen zu hantieren, sondern ermöglicht auch eine direkte Visualisierung der Simulation ohne dies extra implementieren zu müssen.

3.4.1 Übersicht

Das Simulink Modell ist in verschiedene Bereiche gegliedert. Die Gliederung erfolgt allerdings nicht nach der oben genannten strukturellen Unterteilung in tragende Bauteile, bewegliche Teile und Steuerung, sondern stellt eine Mischung aus funktionaler und konstruktiver Baugruppenstruktur dar. Generell lässt sich sagen, dass Bauteile, die im physischen Modell später beieinander liegen werden, im Simulationsmodell auch nahe beieinander sind. Dies dient vor allem zur Vereinfachung der Entwicklung, da Bauteile so leicht ausgetauscht werden können,

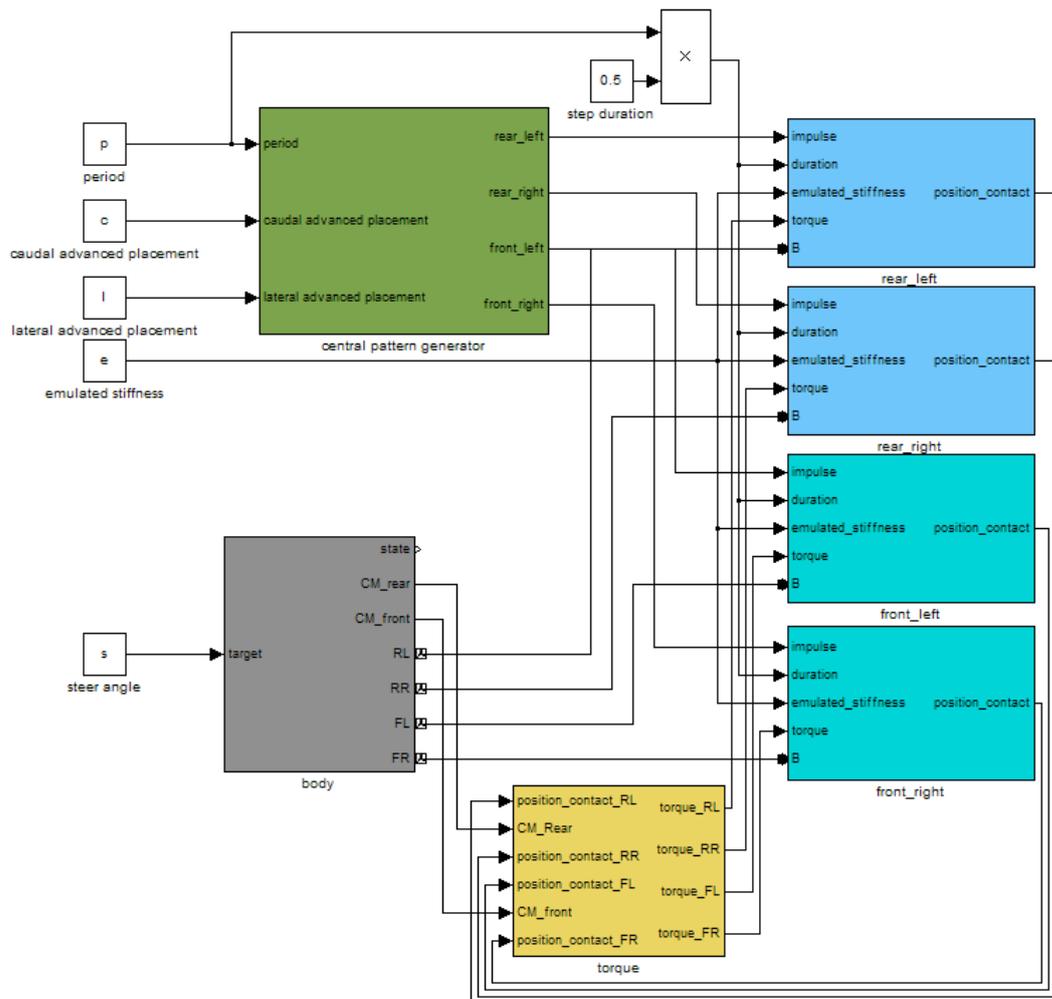


Abbildung 10.: Übersicht über das Simulink Modell, grün dargestellt ist die Steuerung, blau dargestellt sind die vier Beine, grau dargestellt ist der starre Rumpf des Laufroboters, gelb das Modul zur Berechnung der auf den Bden wirkenden Torsion

wie beispielsweise ein vollaktuiertes gegen ein unteraktuiertes Bein. Zur weiteren Erhöhung der Modularität sind allerdings funktionale Gruppen zusammengefasst. Beispielsweise befindet sich der Antrieb eines Kniegelenks im Modell direkt in der Baugruppe des Gelenks selber, obwohl sich der Motor tatsächlich in Höhe des Hüftgelenks, also baulich entfernt befindet. In Abbildung 10 ist eine Übersicht über das Simulink-Modell dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der modulare Aufbau, durch den die Beine (blau) einfach ausgetauscht werden können. Auf der linken Seite sind die vier Parameter zur Manipulation der Gangart und Geschwindigkeit zu sehen. Davon beeinflussen drei der Parameter das Steuerungsmodul (grün) und der vierte, die emulierte Federsteifigkeit, wirkt direkt auf die Beine.

Unten ist der Rumpf gezeigt. Dieses Modul beinhaltet zum einen die Verbindung der Vorder- und Hinterbeine, also das Rückgrat, sowie zum anderen die Hüfte und die Schulter. Außerdem befindet sich in diesem Modul die in jedem Simmechanics-Modell benötigte Verbindung mit dem Boden. Diese Verbindung ist wegen der einfacheren Konfigurierbarkeit durch ein "Custom

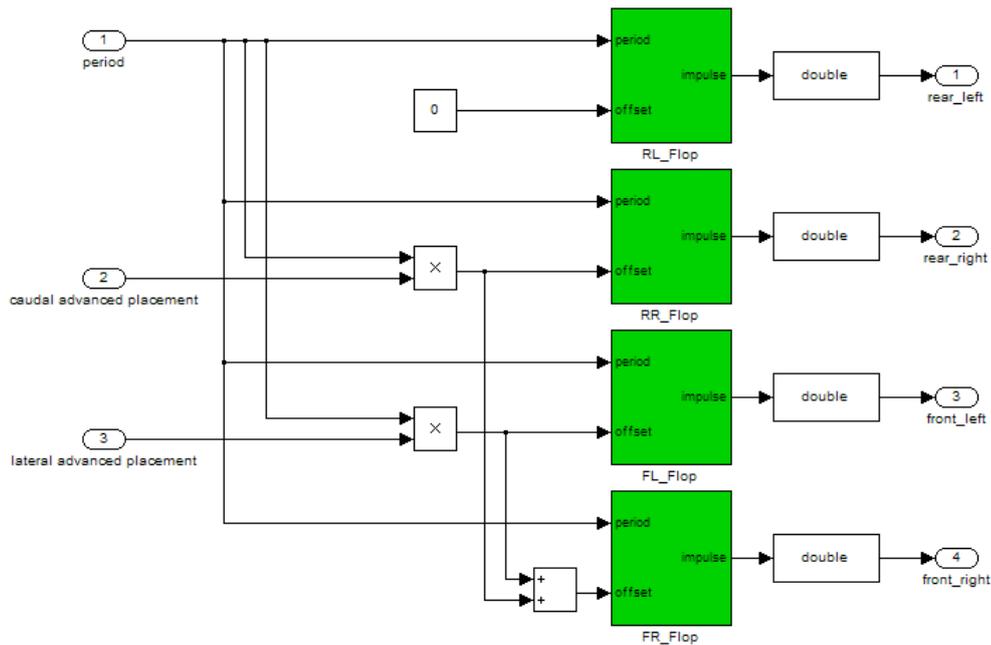


Abbildung 11.: Simulink-Darstellung der Steuerung

Joint” modelliert. Ein weiteres Element, das auf Abbildung 10 oben dargestellt ist, ist der Zusammenhang zwischen Periodendauer und Reizdauer. Solange der Reiz anhält, kontrahieren die künstlichen Muskeln innerhalb des Beins. Die Reizdauer ist adaptiv an die Periodenlänge gekoppelt und beträgt die Hälfte ebendieser.

Gelb dargestellt ist die Berechnung der auf den Boden wirkenden Torsion. Da hierfür Schwerpunktskoordinaten und Geschwindigkeiten benötigt werden, erfolgt die Berechnung nicht direkt im Bodenkontaktmodul, sondern in einem eigenen Modul.

3.4.2 Steuerung

Die Steuerung bildet eine Ausnahme zu der erläuterten Struktur, da sie als reine Software im späteren Modell keine räumliche Ausdehnung besitzen wird. In Abbildung 11 ist der Simulink Aufbau der Steuerung dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung sind die Eingänge Periode, lateraler und caudaler Versatz zu sehen und auf der rechten Seite die Ausgänge für das jeweilige Bein. Dazwischen befinden sich vier Module zur Erzeugung eines kurzen Signals, hier grün dargestellt. Diese Module erzeugen, zur besseren späteren Beschleunigung der Simulation ohne die Verwendung eines Delay-Moduls, ein 0,1 Sekunde langes Signal in Periodenabstand. Der zweite Eingang des Moduls bestimmt den zeitlichen Versatz des Ausgangssignals zur Periode. Die Periodenlänge wird hierdurch nicht beeinflusst. Über den zweiten Eingang des grün dargestellten Moduls lässt sich demnach der Startzeitpunkt des Signals verschieben. Eine solche Verschiebung wird benutzt, um die Signale der vier Beine untereinander zeitlich zu koordinieren.

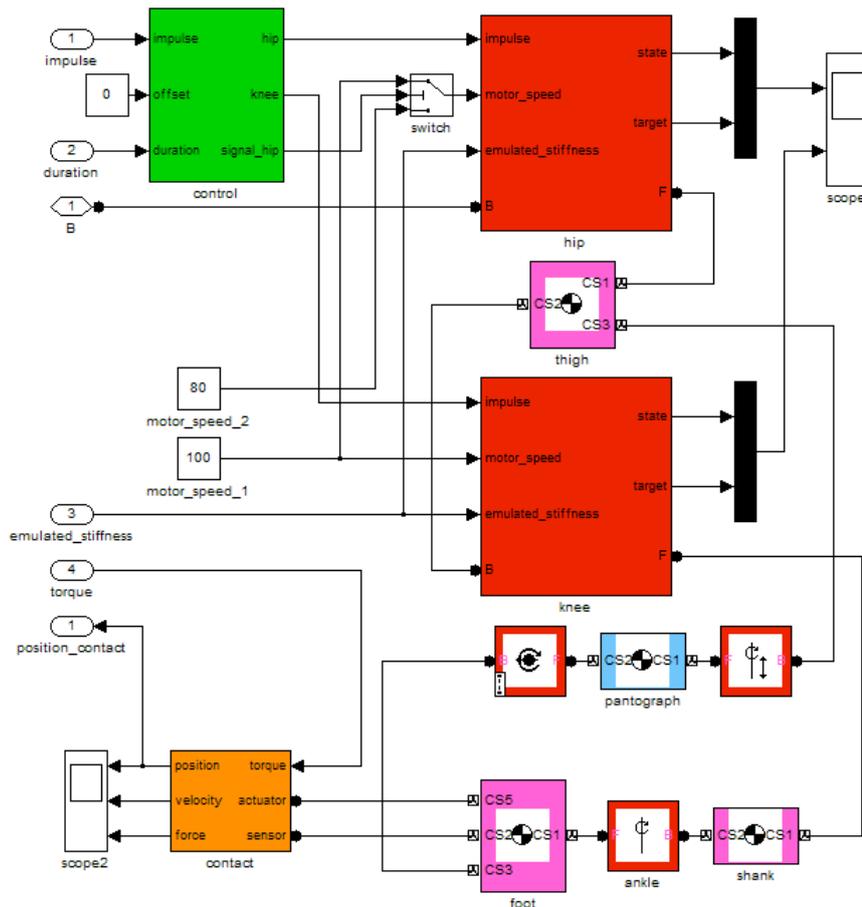


Abbildung 12.: Simulink-Darstellung eines Beins

Zu erkennen ist, dass das hintere linke Bein immer zum Zeitpunkt null ein Signal erhält, da das entsprechende Modul eine Startzeitpunktverschiebung von null aufweist. Die anderen Beine orientieren sich ganz im Sinne der Definition an diesem. Also ergibt sich der Startzeitpunkt des hinteren rechten Beines aus dem Produkt der Periode mit dem caudalen Versatz in Prozent, des vorderen linken Beines aus dem Produkt der Periode mit dem lateralen Versatz in Prozent und der Startzeitpunkt des vorderen rechten Beines aus der Summe dieser beiden Werte.

3.4.3 Bein

Abbildung 12 zeigt den Aufbau eines Bein-Moduls. Die wichtigsten Elemente sind zum einen das Steuerungsmodul, hier grün dargestellt, zum anderen die angetriebenen Gelenke, dargestellt als große rote Module und desweiteren das Bodenkontaktmodul, hier orange abgebildet. Die tragende Struktur des Beines, also die Knochen, sind in Magenta dargestellt, wohingegen der für den Pantographen zusätzlich eingefügte Stab hellblau ist. Nur passiv angetriebene Gelenke sind wie die angetriebenen ebenfalls in rot dargestellt, sie sind allerdings deutlich kleiner. Die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Module Antrieb und emulierte Federsteifigkeit befinden sich beide jeweils in den hier rot dargestellten angetriebenen Gelenken.

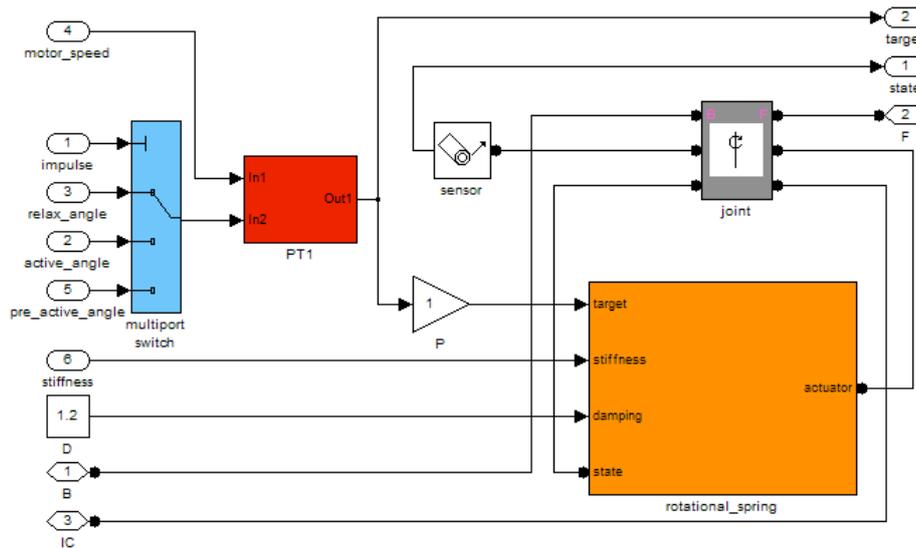


Abbildung 13.: Simulink-Darstellung des Antriebsmoduls

Zu den Besonderheiten des Bein-Moduls zählt die geschlossene kinematische Kette, die ohne mechanische Redundanz konstruiert ist. Zu beachten ist außerdem die Zeitverzögerung von 0,25 Sekunden auf jedes einkommende Signal. Diese Zeitverzögerung besteht in jedem der vier Beine und dient dazu, nach dem Start der Simulation das Modell zunächst zur Ruhe kommen zu lassen, bevor die Bewegung startet.

Alle vier auf der rechten Seite dargestellten Ausgänge dienen nur zur Überwachung und zur Bewertung der Modellbewegung. Fehler im Modell können so frühzeitig erkannt werden und somit ein schneller Simulationsabbruch erfolgen.

3.4.4 Antriebsmodule

Das in Abbildung 13 dargestellte Schema zeigt den Aufbau des Antriebsmoduls eines proximalen Gelenks. Das zentrale Objekt dieser Baugruppe ist das Gelenk aus der Simmechanics-Toolbox, hier mit grauem Rahmen dargestellt, welches über mechanische Verbindungen mit der Basis (B) und dem Nachfolger (F), also den benachbarten beiden Körpern verknüpft ist.

In der realen Maschine wird dieses Gelenk mit Hilfe der in Kapitel 3.3.2 beschriebenen elastischen Seilzüge bewegt. Der Aufbau des Modells weicht an dieser Stelle von dem des realen Modells ab, indem die elastischen Seilzüge durch eine Rotationsfeder ersetzt werden. Bei einer exakten Abbildung des Simulink-Modells auf eine reale Konstruktion säße der Motor direkt auf dem Gelenk und wäre mit diesem über eine Drehfeder verbunden. Die durch einen solchen Aufbau erzielte Bewegung ist der gewünschten und bereits in Kapitel 3.3.2 erläuterten allerdings sehr ähnlich und dazu deutlich einfacher zu simulieren [54]. Eine Vereinfachung auf

diese Lösung ist daher gerechtfertigt. Zusätzlich ist anzumerken, dass das hier gezeigte Modul weder ein Gewicht noch eine Trägheit aufweist, da sich der Motor technisch an einer anderen Position befindet.

Die Drehfeder ist in der Abbildung orange dargestellt. Über den Eingang „Ist“ wird die aktuelle Position des Gelenks ermittelt. Hierbei liegt keine Regelung vor, diese Größe dient einzig zur Berechnung der Federkraft und wird im realen Modell nicht benötigt, da sich die anliegende Kraft aus der Feder selbst ergibt. Der Eingang „Soll“ bestimmt die Ruhelage der Feder, also die Stellposition des Motors. Aus diesen Angaben und der Angabe der Parameter Federsteifigkeit und Dämpfungswert berechnet sich die Federkraft, welche auf das Gelenk über den Ausgang „Gelenk_Aktuator“ wirkt. Der Dämpfungswert fasst dabei sowohl den eigentlichen Dämpfungswert der Feder selbst, als auch die auf das Gelenk wirkende Reibung zusammen.

Der Sollwert der Drehfeder wird ermittelt über einen „Multi-Switch“, der mit Hilfe des an dieser Stelle nicht binären, sondern tertiären Reizes zwischen den für dieses Gelenk eingprägten drei Zuständen entscheidet. Dieses Modul ist in Abbildung 13 blau dargestellt. Die Verzögerung des realen Motors wird im Modell durch ein PT_1 -Glied mit konstantem T-Anteil modelliert. Die Reduzierung des T-Anteils führt zu einer Reduzierung der Motorgeschwindigkeit und ist vor allem für die Bewegung in langsamen Gangarten interessant. Eine Kopplung dieses Wertes an die Periodendauer ist daher durchaus sinnvoll.

Weitere Parameter des Antriebsmoduls sind das in Abbildung 13 unten links dargestellte Modul zur Definition des Startwertes¹⁷ und die oben rechts dargestellten Werte „Ist“ und „Soll“ zur weiteren Verarbeitung und Bewertung der Bewegung des Gelenks.

3.4.5 Bodenkontakt

In Abbildung 14 ist das Bodenkontaktmodell dargestellt. Dieses Modul erkennt zum einen ob ein Bodenkontakt vorliegt und zum anderen welche Kräfte, bedingt durch Haft- und Gleitreibung dadurch auf den Körper wirken. Außerdem wird hier die Bodenkantur definiert. Dieses Modul ist äußerst komplex, weshalb hier nur auf die generelle Funktionsweise eingegangen werden soll. Das Bodenreibungsmodell, hier grün dargestellt, ist eine für den Einsatz im Dreidimensionalen weiterentwickelte Version des Modells, was auch für die Entwicklung des Jena-Walkers verwendet wurde [60]. Dieses Modul wird aktiviert, sobald sich die Höhe des Berührungspunktes unterhalb des Bodens befindet. Die Höhe des Bodens selbst wiederum setzt sich zusammen aus einer Funktion, im abgebildeten Fall eine zehn-prozentige Steigung, und der Position des Fußpunktes im Raum. Da sich im Bodenreibungsmodell Probleme ergäben, wenn der Kontakt oberhalb der Null-Ebene auftreten würde, wird die Position des Fußpunktes für die Reibungsberechnung an die Null-Ebene gesenkt bzw. angehoben. Die drei entstehenden Kräfte wirken über einen „Body-Actuator“ auf den Schwerpunkt des angehängten Gliedes.

¹⁷ IC, Initial Condotion (engl. Startwert)

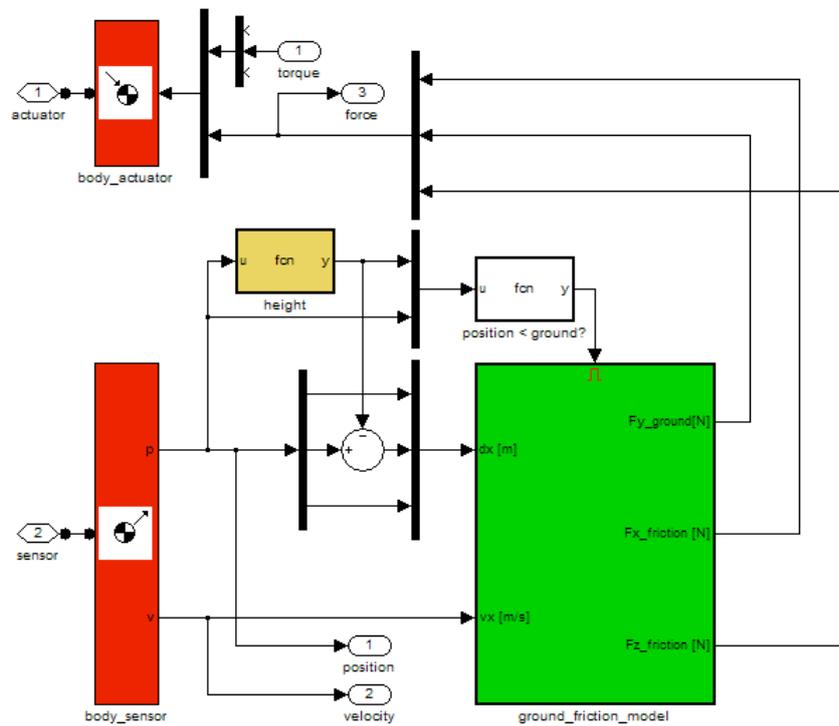


Abbildung 14.: Simulink-Darstellung des Bodenkontaktmodells

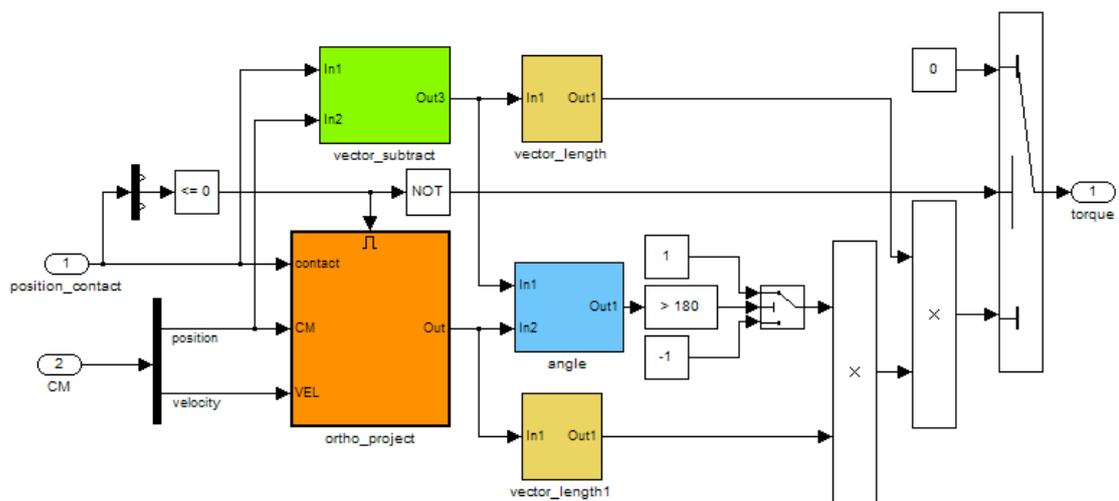


Abbildung 15.: Simulink-Darstellung der Torsionsberechnung

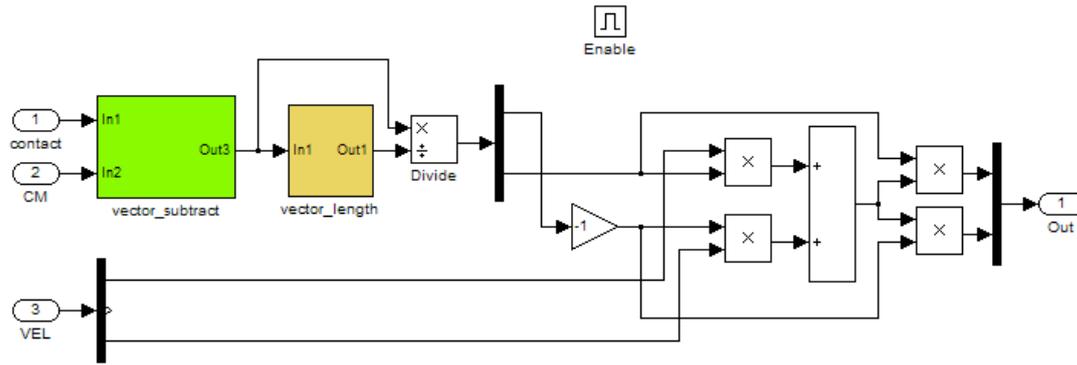


Abbildung 16.: Simulink-Darstellung der Berechnung der orthogonalen Projektion

Weitere Teile des Bodenkontaktmodells sind die in den Abbildungen 15 und 16 dargestellten Module zur Torsionsberechnung. Mit Hilfe dieser Module werden die durch die Bewegung des Gesamtschwerpunktes verursachten Rotationsbewegungen auf die einzelnen Fußpunkte übertragen. Hierfür werden zunächst die Schwerpunkte lotrecht auf die Nullebene projiziert. Es sei der Vektor zum Fußpunkt A, zum Schwerpunkt B und der Geschwindigkeitsvektor C, mit

$$A = \begin{pmatrix} a1 \\ a2 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} b1 \\ b2 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} c1 \\ c2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Aus den resultierenden Vektoren wird der orthogonale Anteil des Geschwindigkeitsvektors des Schwerpunktes zur Verbindung von Position des Fußpunktes zu Position des Schwerpunktes berechnet. Hierfür sei zunächst

$$Q = B - A = \begin{pmatrix} q1 \\ q2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Dann ist O, mit

$$O = \begin{pmatrix} q2 \\ -q1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

orthogonal zu Q. Projiziert man nun den Geschwindigkeitsvektor C auf O, erhält man den orthogonal auf Q stehenden Vektor P mit

$$P = OO^T C \quad (11)$$

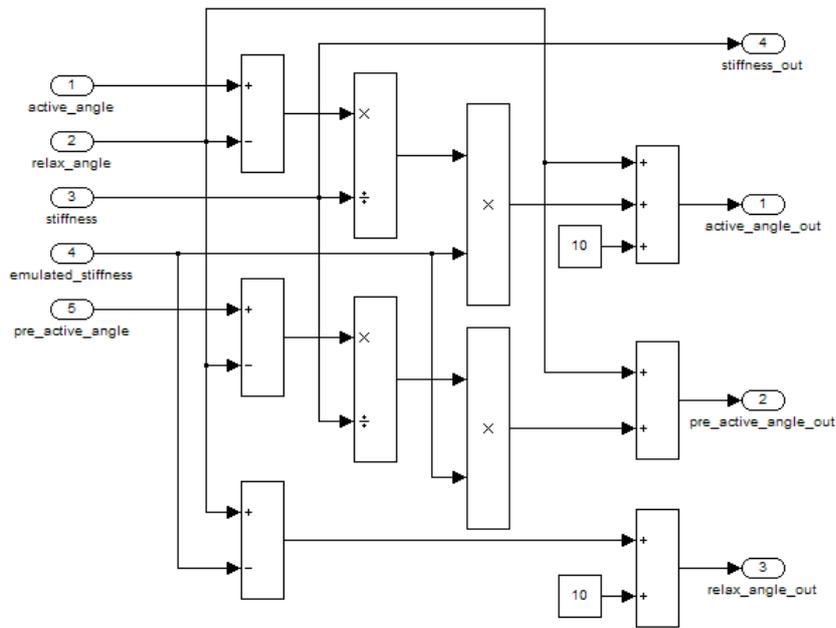


Abbildung 17.: Simulink-Darstellung des Moduls für die emulierte Federsteifigkeit

Das in Abbildung 16 gezeigte Modul führt die orthogonale Projektion durch. Zur Berechnung des Vorzeichens der wirkenden Kraft wird der Winkel α zwischen Q und C betrachtet. Der Winkel berechnet sich aus

$$\alpha = \arccos\left(\frac{Q * C}{|Q| * |C|}\right) \quad (12)$$

Beträgt der Winkel α einen Wert zwischen 0 und 180 ist der Faktor $f = 1$, ansonsten ist $f = -1$. Die Länge des Vektors P multipliziert mit dem Faktor f ergibt die benötigte Torsionskraft auf den Fußpunkt. Die benötigten Berechnungsschritte werden in dem in Abbildung 15 dargestellten Modul durchgeführt. Es ist außerdem anzumerken, dass diese Kraft nur wirkt, wenn ein Bodenkontakt besteht.

3.4.6 Emulierte Federsteifigkeit

Abbildung 17 zeigt das Modul zur Berechnung der emulierten Federsteifigkeit. Aus dem Aufbau aus Abbildung 17 ergibt sich mit den Definitionen aus Tabelle 3:

$$\alpha = e * \frac{a - r}{f} + r + p \quad (13)$$

$$\beta = r - e + p \quad (14)$$

$$\gamma = e * \frac{b - r}{f} + r \quad (15)$$

Benennung im Modell	Beschreibung	Variable oder Wert
active_angle	Soll-Winkel bei aktivem Signal	a
relax_angle	Soll-Winkel wenn Signal aus	r
pre_active_angle	Soll-Winkel bei aktivem zweiten Signal	b
stiffness	Steifigkeit der verbauten Feder	s
emulated_stiffness	emulierte Federsteifigkeit	e
active_angle_out	korrigierter Winkel a	α
relax_angle_out	korrigierter Winkel r	β
pre_active_angle_out	korrigierter Winkel b	γ
stiffness_out	Steifigkeit der verbauten Feder	σ
scalar	Winkeloffset	p

Tabelle 3.: Begriffe aus dem Simulink Modell der emulierten Federsteifigkeit

$$\sigma = f \quad (16)$$

Gleichung (13) berechnet dabei die Auslenkung des Motors in Abhängigkeit von der emulierten Federsteifigkeit e und der tatsächlich verbauten Federsteifigkeit f . Als Ausgangslage dient die Ruhelage des Motors. Das dargestellte System ist demnach vollständig an die gegebenen Parameter angepasst und kann modular in allen Gelenken eingesetzt werden. Für den Einsatz in einem proximalen Gelenk ist auch die Berechnung des dritten Winkels durch die Gleichung (15) vorgesehen.

Das in Gleichung (13) und (14) addierte Skalar $p = 10$ dient zur besseren Anpassung der emulierten Steifigkeit an die tatsächliche, vor allem im relevanten Bereich von ≈ 8 bis ≈ 16 bei Belastung durch das Eigengewicht des Roboters plus einem Kilogramm Zuladung.

Die Federsteifigkeit wird ohne Korrektur durch das Modul durchgeleitet. Dies dient zur besseren Übersichtlichkeit in den parentalen Modulen und ist hier nur zur Vollständigkeit hinzugefügt.

3.5 Bewertung des Modells

Grundsätzlich ist zu sagen, dass das Modell einen Kompromiss aus möglichst hoher Realitätsnähe und gleichzeitig möglichst hoher Abstraktion für schnellere Berechenbarkeit darstellt.

Eine der schwerwiegendsten Abstraktionen stellt sicher das Bodenkontaktmodell dar. Der Boden ist prinzipiell als sehr starre Feder modelliert, was einem realen Boden tatsächlich sehr nahe kommt. Geben Statiker allerdings den für Bodenberechnungen herangezogenen Steifigkeitswert von > 50.000 an, so hat das Modell lediglich einen Wert von etwa 8.000, das heißt es handelt sich im Modell um eine deutlich weichere Feder, der Boden ist somit verhältnismäßig nachgiebig. Das größere Problem allerdings ist die im Modell fehlende Dämpfung der Bewegung in Richtung der Höhenachse. Eine solche ist zwar durch die Beschränkung der Relaxationsgeschwindigkeit der Feder implementiert, eine Berechnung mit realistischen Werten ist

allerdings wegen der unverhältnismäßig langen Rechenzeiten schwierig. Außerdem sind noch weitere Vereinfachungen getroffen, wie zum Beispiel der fehlende Höhenausgleich bei auftretender Gleitreibung oder mangelnde Gleitbewegung auf nicht geraden Bahnen, zum Beispiel bei Rotationen. Durch ein Modell zur Berechnung der Bewegung des Schwerpunktes bezogen auf einen Kontaktpunkt kann zwar eine Drehung prinzipiell ausgeführt werden, allerdings nur dann, wenn nur ein einziger Fuß den Boden berührt. Die Berechnung des bei einer Rotation mit mehreren Kontakten resultierenden Gleitens in einer Kreisbahn ist mit dem Bodenkontaktmodell nicht möglich. Eine realitätsnähere Modellierung würde die ohnehin schon langen Rechenzeiten noch deutlich verlängern. Allerdings sind die bei dem verwendeten Kompromiss berechneten Werte sehr glaubwürdig und reichen für eine Kinematikstudie des Laufroboters durchaus aus.

Eine weitere Abstraktion findet sich in der tragenden Struktur, dem Knochenaufbau des Modells. Sowohl die Knochen eines Tieres, als auch die in der späteren Konstruktion verwendeten Stäbe besitzen eine material- und formabhängige Biegesteifigkeit. Auf diese wird im gesamten Modell verzichtet, da eine solche Modellierung den Berechnungsaufwand deutlich erhöhen würde und ohnehin nur eine Annäherung an die realen Werte geblieben wäre.

Die Massen und Trägheiten der Körper sind aus dem 3D-CAD Modell entnommen und somit äußerst präzise. Dazu wurden in einem weiteren Arbeitsschritt nach der Modellierung des CAD-Modells die Trägheitsdaten aus dem Modell extrahiert und zur Validierung und weiteren Berechnung in das Simulink Modell eingefügt.

Zu beachten ist außerdem, dass nur in den angetriebenen Gelenken eine Reibung simuliert wird. Die nicht-aktuierten Gelenke Knöchel, und die beiden für den Pantograph benötigten, arbeiten im Modell reibungsfrei. Diese Abstraktion ist ebenfalls der schnelleren Berechenbarkeit des Modells geschuldet. Eine zusätzlich in den Gelenken getroffene Vereinfachung ist das Fehlen der Masse.

Bereits angesprochen wurde die Vereinfachung der Antriebe selbst, die nicht wie gefordert das jeweilige Glied über Seilzüge bewegen, sondern ohne Seilzüge mit Hilfe von Drehfedern modelliert sind. Dieser Unterschied stellt allerdings nur eine mathematisch geringe Abweichung dar, die ohnehin durch die approximierten Reibungswerte und die emulierte Federsteifigkeit kompensiert wird [54].

Trotzdem beschreibt das Modell die Bewegung des Laufroboters glaubwürdig, da die genannten Vereinfachungen, abgesehen vom Bodenkontaktmodell, nur einen geringen Einfluß auf die Dynamik des Modells besitzen und bei den anvisierten Dimensionen des Roboters durchaus vernachlässigbar sind.

3.6 Zusammenfassung

Das als Basis für die in Kapitel 4 beschriebenen Versuche dienende Modell vereint einige Ideen zur Verbesserung der beinigen Fortbewegung von Robotern sowohl in der bionisch inspirierten mechanischen Struktur, als auch in der bionischen Steuerung. Neben der Kompromisslösung aus schneller Berechenbarkeit und genauer Abbildung der Realität sind die Besonderheiten des Modells vor allem die emulierte Federsteifigkeit, zur Anpassung der Bewegung an eine scheinbare Änderung der realen Federsteifigkeit, ohne diese tatsächlich zu ändern, die Bewegung der Beine über biologischen Muskeln nachempfundenen elastischen Antriebsmodulen und der optimierte Aufbau der unterschiedlich garteten Vorder- und Hinterbeine, welche zudem unteraktuiert über eine Pantographenstruktur betrieben werden.

Als weitere Besonderheit kann auch das Bodenkontaktmodell angesehen werden, welches zwar die in Kapitel 3.5 beschriebenen Abstraktionen aufweist, trotzdem allerdings brauchbare Werte produziert. Das Bodenkontaktmodell stellt in den meisten Modellen dieser Art das größte Problem dar. Es wird daher meist durch alternative Lösungen, wie zum Beispiel ein am Boden befestigtes Kugelgelenk, oder grobe Approximationen, wie zum Beispiel die ausschließliche Betrachtung des Modells in einer zwei-dimensionalen Ebene dargestellt. Das hier verwendete Modell ermöglicht nicht nur eine Bewegung im Raum, sondern berechnet auch die benötigten Haft- und Gleitreibungsdaten und erlaubt außerdem die Einbindung von Höhenfunktionen zur Untersuchung von Verhalten auf unebenem Untergrund.

Eine nächste erwähnenswerte Besonderheit ist das in Kapitel 3.3.3 beschriebene ausgeklügelte System zur Ansteuerung des Modells. Die Steuerung eines Laufmodells über die vier genannten Parameter zur theoretischen Bewegung in allen existierenden Gangarten stellt, wie auch der Einsatz einer emulierten Federsteifigkeit bei einem Laufroboter eine Neuerung dar. Zudem ist die Bewegung der Glieder über Seilzüge noch in keinem bekannten vierbeinigen Laufroboter verwendet worden.

4 Simulation und Optimierung

4.1 Übersicht

Einleitend ist zu sagen, dass sowohl die Fortbewegung mit Hilfe der in Kapitel 3 beschriebenen Antriebe und Kinematiken, als auch die Variation der Gangarten im Modell funktionieren. Obwohl der Roboter über keinerlei Regelung verfügt, ist er in der Lage auch auf unebenem Untergrund stabil zu laufen und bei etwaigen Hindernissen seine Bewegungen selbstständig anzupassen um das Hindernis zu überwinden. Dadurch, dass während des Entwicklungsprozesses keine Art der Regelung verwendet wurde, konnte eine Struktur mit kinematischer Intelligenz entstehen, die durch den späteren eventuellen Einsatz von Regelung noch weiter an Robustheit gewinnen wird.

Sowohl die Simulation als auch die Optimierung wurde in MATLAB Simulink durchgeführt. Neben der in Kapitel 3.4 genannten Toolbox SimMechanics, kamen für die Durchführung der Optimierung noch die Toolboxes „Optimierung“ und „Signal Processing“ zum Einsatz.

4.2 Beinformen

Die Aufgabenstellung verlangt die Verwendung eines unteraktuierten, also nicht komplett angetriebenen Beinaufbaus zur Bewegung des Laufroboters. Ein Ansatz zur Ermittlung eines optimalen Beinaufbaus ist die Strukturoptimierung, deren Pendant in der Biologie die Makroevolution, also die Evolution tiefgreifender Änderungen ist [61]. Eine solche Optimierung ist in diesem Fall jedoch undenkbar, da sie zum einen zu lange dauern würde, und zum anderen nicht dem bionischen Konzept entspräche sich an bereits optimalen Strukturen in der Natur zu bedienen.

Zum besseren Verständnis der Fortbewegungsmechanismen und zum Vergleich der verschiedenen Strukturen wurden also verschiedene Ansätze aus der Natur und der Technik überprüft. Ein spezieller Versuchsaufbau dient hierbei zur vereinfachten Vergleichbarkeit der Konzepte. Getestet wird jeweils ein Beinpaar gleicher Beinform, welches zur Stabilisierung nicht zur Seite kippen kann, sich also nur in einer zweidimensionalen Ebene bewegt. Verglichen werden grundlegende Eigenschaften bei gleicher Anregung und Dimension der Beinpaare, nämlich durchschnittliche Geschwindigkeit und Energieverbrauch. Außerdem werden noch Laufeigenschaften bei verschiedenen Hindernissen untersucht. Die Hindernisse umfassen eine 16 Zentimeter hohe Stufe, eine Kombination aus zehn-prozentiger Steigung und zehn-prozentigem Gefälle, also eine Gradübersteigung und eine stetige steiler werdende Steigung. Betrachtet man ein unteraktuiert betriebenes Bein, ist offensichtlich, dass alle nicht direkt angetriebenen Beine für

Beinmodell	v[m/s]	Energieverbrauch	Stufe	Auf-Ab	Steigung[%]
Vollaktuiert	0,7	631,7	ja	ja	10%
starrer Pantograph	0,5	407,8	ja	ja	35%
starrer Kreuz-Pantograph	0,7	347,7	ja	ja	25%
elastischer Pantograph	0,2	1146,0	nein	nein	0%
elastischer Kreuz-Pantograph	0,4	744,3	nein	nein	5%

Tabelle 4.: Vergleich verschiedener Beinstrukturen. Der Energieverbrauch ist in der Einheit $\sum \delta\varphi/m$ aufgetragen, wobei φ die Winkelposition ist.

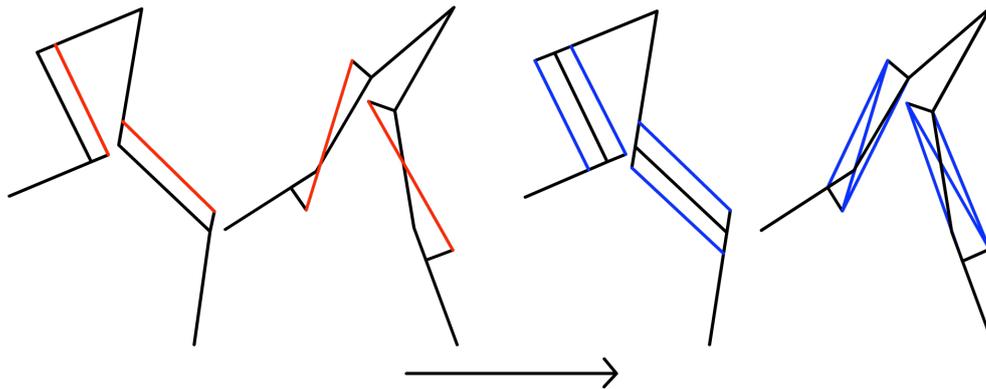


Abbildung 18.: Vergleich von verschiedenen Beinkinematiken. Links: Pantograph mit starrem Stab (rot), mitte links: Kreuz-Pantograph mit starrem Stab (rot), mitte rechts: Pantograph mit elastischen Verbindungen (blau), rechts: Kreuz-Pantograph mit elastischen Verbindungselementen (blau). Der Pfeil zeigt die Laufrichtung der Beinpaare an.

die Fortbewegung des Roboters in einer tierähnlichen Dynamik indirekt angetrieben werden müssen. Die Ergebnisse der vier besten der untersuchten Ansätze finden sich neben denen des vollaktuierten Modells in Tabelle 4. Strukturdarstellungen der vier beschriebenen Aufbauten sind außerdem in Abbildung 18 dargestellt. Die in der Tabelle aufgetragenen Geschwindigkeiten sind in der Einheit Meter pro Sekunde angegeben. Anstelle der Energieverbräuche hingegen sind, mangels exaktem Datenblatt der verwendeten Motoren, lediglich die Summen der integrierten Winkeländerungen für einen Meter gelaufene Strecke aufgeführt. Da diese Konvention bei allen getesteten Modellen eingehalten wurde, ist dennoch ein Vergleich möglich.

Wegen seiner einfachen Struktur, der hohen Robustheit, den einfachen Optimierungsmöglichkeiten und der Nähe zum biologischen Vorbild ist der bereits in Kapitel 3.3.1 erklärte und in Abbildung 18 links dargestellte starre Pantograph die am besten geeignete Lösung für das Modell. Um die Geschwindigkeit zu erhöhen und gleichzeitig den Energieverbrauch zu senken dient im Ansatz Kreuz-Pantograph ein Hebel als Getriebe zur Vergrößerung der Bewegung. Die Struktur dieses Ansatzes ist in Abbildung 18 in der Mitte links zu finden. Dass dies tatsächlich sowohl die Geschwindigkeit erhöht, als auch den Energieverbrauch senkt ist in Tabelle 4 abzulesen. Problem des Ansatzes ist jedoch seine geringere Robustheit, hier schon durch die geringere Steigfähigkeit zu erkennen, und vor allem seine deutlich höhere Komplexität, was zum

einen das Gewicht des Beines erhöht und zum anderen eine Erschwernis bei der Optimierung und Anpassung darstellt.

Da bei einer normalen Pantographenstruktur die Elastizität durch den Einsatz eines starren Stabes im untersten Gelenk verloren geht, wurden im Rahmen der hier beschriebenen Analyse auch Beinmodelle getestet, bei welchen im Pantograph kein Stab, sondern ein System von vier Federn eingesetzt ist. Dieser elastische Ansatz wurde sowohl mit einer parallelen Pantographenstruktur, in Abbildung 18 in der Mitte rechts, als auch mit einer über-Kreuz-Pantographenstruktur, in Abbildung 18 ganz rechts dargestellt, getestet. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass das Verhalten bei sehr steifen Federn identisch ist mit dem des starren Aufbaus, bei weicheren Federn sich das dynamische Verhalten jedoch verschlechtert. Beispielhaft sind in Tabelle 4 zwei elastische Ansätze mit mittlerer Steifigkeit von 14 N/m aufgetragen. Die positive Wirkung der Elastizität im untersten Gelenk ist zumindest für den dargestellten Versuchsaufbau zu vernachlässigen, ja sogar schädlich für die Dynamik des Systems.

Nach der Entwicklung der prinzipiellen Struktur, in der Biologie als Makroevolution bezeichnet, folgt die Anpassung der Struktur an die speziellen Bedürfnisse. Dieser Vorgang wird in der Biologie als Mikroevolution bezeichnet und kann technisch durchaus durch einen Parameter-Optimierungsprozess durchgeführt werden. Angewendet werden soll der Prozess auf den Aufbau der Beine, genauer auf die Längen der jeweiligen Glieder.

Der Versuchsaufbau besteht genau wie beim vorherigen Versuch aus einem Beinpaar gleicher Beine, das eine Teststrecke mit den genannten Hindernissen Stufe, Auf-Ab-Kombination und Steigung abläuft. Verglichen wurden über eine starre Pantographenstruktur bewegte unteraktivierte Beine mit unterschiedlichen Längenverhältnissen, zur Vergleichbarkeit jedoch mit gleicher Hüfthöhe. Alle in Tabelle 5 dargestellten Beine haben sowohl die Stufe, als auch die Auf-Ab-Kombination übersteigen können. Wie auch in Tabelle 4 sind in Tabelle 5 Geschwindigkeit in Meter pro Sekunde und Energieverbrauch in Gesamtwinkeländerung pro gelaufenen Meter aufgetragen. Die in den ersten zehn Sekunden gelaufene Strecke dient zudem zum besseren Vergleich der Dauer der Beschleunigungsphase des Roboters und ist in Metern aufgetragen. Wie auch das Vorbild in der Natur besitzt das Gesamtmodell, also das vierbeinige Modell aus Kapitel 3, den prinzipiell gleichen Aufbau von Vorder- und Hinterbeinen, jedoch mit anderen Längenverhältnissen. Die Hinterbeine eines Hundes haben, wie aus Abbildung 8 zu entnehmen, etwa ein Längenverhältnis von Oberschenkel (OS) zu Unterschenkel (US) zu Fuß (FU) von 1:1:1. Die Ergebnisse des Versuchs attestieren diesem Längenverhältnis, wie aus Tabelle 5 abzulesen, eine hohe Geschwindigkeit mit niedrigem Energieverbrauch, dazu jedoch eine geringe Steigfähigkeit. Analysiert man zudem die zu den Messdaten gewonnene Animation, zeigt sich für das Verhältnis eins zu eins zu eins eine hohe Stabilität, gekennzeichnet durch geringes Schwanken und einem gutmütigem Verhalten bei geänderten Startbedingungen des Roboters.

Die Vorderbeine besitzen neben der Wahrung der Stabilität des Systems noch die Anforderung,

Verhältnis OS:US:FU	v[m/s]	Energieverbrauch	Steigung	gelaufene Strecke[m]
1 : 1 : 1	0,6	401,6	32%	4,379
4 : 5 : 5	0,5	407,8	35%	3,714
4 : 5 : 4	0,48	426,1	36%	3,916
4 : 5 : 2	0,5	419,7	32%	4,157
4 : 4 : 5	0,65	366,7	34%	5,051
1 : 1 : 2	0,55	410,8	45%	4,120

Tabelle 5.: Vergleich verschiedener Längenverhältnisse im Pantographenbein. OS - Oberschenkel, US - Unterschenkel und FU - Fuß. Der Energieverbrauch ist in der Einheit $\sum \delta \varphi / m$ aufgetragen, wobei φ die Winkelposition ist.

Lenkbewegungen über die in Kapitel 3.3.1 beschriebene Struktur auf den Boden zu übertragen. Ein Test am Gesamtmodell belegt zwar beim Einsatz von vier exakt gleich aufgebauten Beinen eine sehr hohe Geschwindigkeit, jedoch auch eine reduzierte Stabilität bei einem Lenkeinschlag.

Feinoptimierung des Vorderbeinaufbaus

Basierend auf den Messergebnissen in Tabelle 5 wurde am Gesamtmodell eine Optimierung der Längenverhältnisse der Vorderbeine durchgeführt. Als Gütefunktion wird die Geschwindigkeitskurve über simulierte Zeit betrachtet. Diese Funktion soll möglichst zu jedem Zeitpunkt einen Wert größer null aufweisen, d.h. der Roboter soll sich konstant vorwärts bewegen. Dies ist bei beiniger Fortbewegung mit deutlich schwankender Geschwindigkeit ein ausreichendes Kriterium für stabile Fortbewegung. Weiterhin soll die Richtung des Roboters bei einem Lenkeinschlag von null Grad möglichst geradeaus sein. Als Nebenbedingung ist definiert, dass die Summe der drei Optimierungsparameter Oberschenkellänge, Unterschenkellänge und Fußlänge zwischen zwei vorgegebenen Werten liegt.

Das Ergebnis der Optimierung bestätigt die vorher getroffene Vermutung und auch den hohen Wert des Einsatzes der Bionik für dieses Problem. Nach der Optimierung mit verschiedenen Verfahren und jeweils verschiedenen Startbedingungen zeigt sich, dass ein Längenverhältnis von eins zu eins zu zwei der drei Vorderbeinglieder zueinander, wie es zum Beispiel auch beim Vorderbein des in Abbildung 8 gezeigten Thailand Ridgeback vorliegt, die beste Lösung für eine konstante stabile Vorwärtsbewegung ist. Drei Optimierungsverfahren mit den in Tabelle 6 unter Optimierungsverfahren eins bis drei dargestellten Parametern, sowie ein genaueres Optimierungsverfahren mit den in Tabelle 6 unter Optimierungsverfahren vier dargestellten Parametern brachten nahezu dieselben Ergebnisse. Durchgeführt wurden die Optimierungsverfahren mit der Toolbox Signal Processing welche direkt in das Simulink-Projekt integriert werden konnten und wodurch zum einen, im Gegensatz zur externen Optimierung prinzipiell kein Black-Box Problem vorliegt, da jegliche Daten dem Optimierungsverfahren zugänglich sind, und zum anderen eine schnelle und einfach anzupassende Anwendung garantiert wird,

Optimierungsverfahren	1	2	3	4
Solver	ODE113	ODE113	ODE113	ODE15s
Max Step Size	auto	auto	auto	1e-3
Min Step Size	auto	auto	auto	1e-15
Relative Tolerance	1e-5	1e-5	1e-5	1e-4
Absolute Tolerance	auto	auto	auto	1e-7
Optimierungsverfahren	Gradient Descent	Gradient Descent	Simplex	Gradient Descent
Startwerte	0,6 : 0,6 : 1,2	0,6 : 0,6 : 0,6	0,7 : 0,7 : 1,0	0,6 : 0,6 : 1,2
Parameter Tolerance	0.001	0.001	0.001	0.001
Function Tolerance	0.001	0.001	0.001	0.001
Constraint Tolerance	0.001	0.001	0.001	0.001
Maximum Iterations	100	100	100	100

Tabelle 6.: Optimierungsparameter

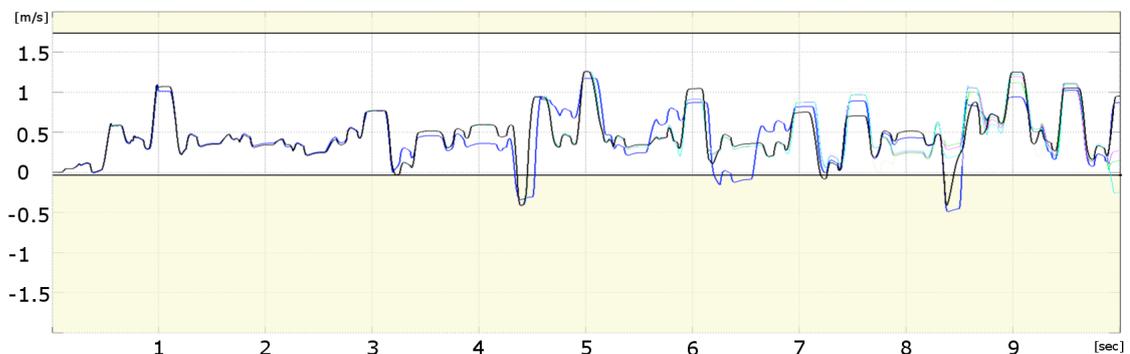


Abbildung 19.: Graphendarstellung der Gütefunktion der Optimierung. Die optimale Lösung ist dabei schwarz hervorgehoben. Der weiß hinterlegte Teil des Graphen markiert die Fläche, in der sich die Funktion bestenfalls ausschließlich bewegen sollte. In diesem Fall repräsentiert die Funktion die Geschwindigkeit, und sollte möglichst jederzeit größer als null sein. Zur Garantie einer gleichmäßigen Bewegung ist außerdem eine Obergrenze eingerichtet.

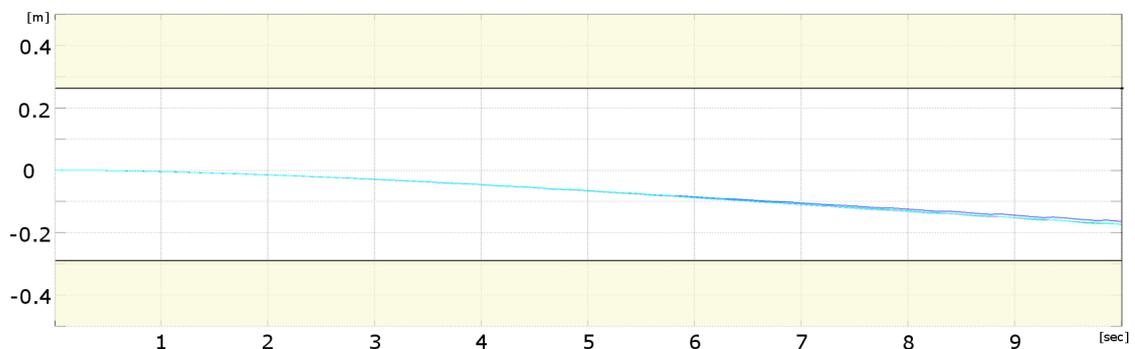


Abbildung 20.: Die zweite Nebenbedingung der Optimierung. Beschränkung der Laufrichtung des Roboters.

Optimierungsverfahren	Oberschenkellänge[m]	Unterschenkellänge[m]	Fußlänge[m]
1	0,6262	0,5433	1,2764
2	0,7803	0,6949	1,2238
3	0,6227	0,5851	1,3623
4	0,5901	0,6077	1,2198

Tabelle 7.: Ergebnisse der Optimierung

da kein Import in fremde Software benötigt wird. Beispielhaft sind in Abbildung 19 und 20 die Ergebnisse des Optimierungsverfahrens mit den in Tabelle 6 unter Optimierungsverfahren Nummer 5 aufgeführten Parametern dargestellt. Die exakten Ergebnisse der Optimierung sind in Tabelle 7 aufgetragen. Trotz der leicht abweichenden Ergebnisse wird das generelle Verhältnis von etwa eins zu eins zu zwei bestätigt. Die Längen in Tabelle 7 sind in Metern angegeben, sind allerdings nicht direkt auf das Modell übertragbar, sondern müssen mit dem Faktor 1/6 multipliziert werden.

4.3 Gangarten

Die Aufgabenstellung verlangt, dass die zu entwickelnde Kinematik eine Fortbewegung in verschiedenen Gangarten ermöglichen soll. Um dies zu überprüfen und auch zu beweisen, muss natürlich auch eine geeignete Ansteuerung entwickelt werden. Der Aufbau und die Funktionsweise der Steuerung sind in Kapitel 3.3.3 ausführlich beschrieben.

Untersucht man die Fortbewegung des Roboters bei gleichzeitiger Variation der verschiedenen Parameter zeigt sich schnell, dass eine Bewegung in verschiedenen Gangarten möglich ist. Selbst bei der Variation eines einzelnen Parameters lassen sich Unterschiede in der Gangart feststellen.

Betrachtet man zunächst ein zweibeiniges Modell, welches wie auch das in Kapitel 4.2 beschriebene gegen eine Bewegung zur Seite geschützt ist, lässt sich der Wechsel der Gangarten durch ein Überschreiten der Froude-Zahl bei lediglicher Variation der emulierten Federsteifigkeit beweisen. Abbildung 21 zeigt die Federsteifigkeit des Modells in rot dargestellt, neben der Froude-Zahl, hier in blau dargestellt. Ein Überschreiten der Froude-Zahl eins, ist nach etwa 14 Sekunden, bei einer emulierten Federsteifigkeit von etwa zehn zu beobachten. Per Definition muss spätestens hier ein Wechsel von der Gangart Gehen in die Gangart Laufen passieren; ein Wechsel der Gangart durch ausschließliche Variation der emulierten Federsteifigkeit ist somit zumindest in diesem abstrahierten Testmodell bewiesen. Dieser Ansatz lässt sich auf das vierbeinige Modell übertragen und wird in Kapitel 4.4 noch näher ausgeführt. Abbildung 22 zeigt die Geschwindigkeitsänderung des Modells durch eine Verringerung der Periodendauer von 1 auf 0,8 Sekunden und gleichzeitiger Erhöhung der emulierten Federsteifigkeit von 10 N/m auf 14 N/m nach fünf Sekunden Simulationsdauer. Zu erkennen ist ebenfalls eine Geschwindigkeitsänderung, in diesem Fall eine Beschleunigung. Außerdem ist durch eine Änderung des

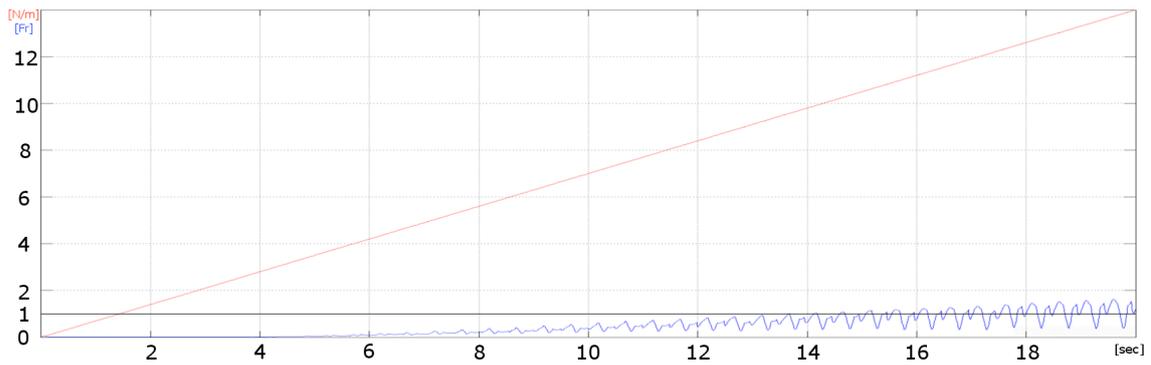


Abbildung 21.: Variation der emulierten Federsteifigkeit (rot) führt zu erhöhter Froude-Zahl (blau)

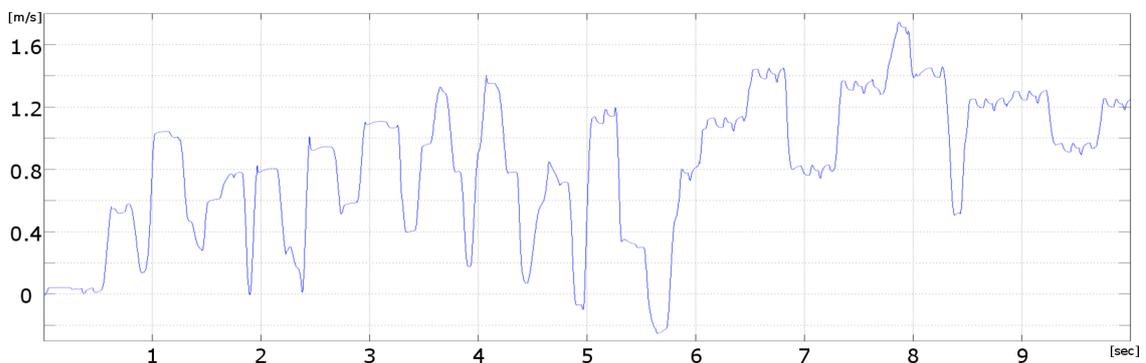


Abbildung 22.: Geschwindigkeitsänderung durch Variation der emulierten Federsteifigkeit von 10 N/m auf 14 N/m und der Periodendauer von 1 auf 0,8 Sekunden bei Sekunde 5

Geschwindigkeitsprofils die Änderung der Gangart zu erkennen. In diesem speziellen Fall liegt ein Wechsel vom Mitteltrab in die Sprunggangart Renntwab vor.

Den Geschwindigkeitsverlauf des Modells bei einer Änderung aller Parameter zeigt Abbildung 23. Hierbei wurde abermals nach fünf Sekunden die emulierte Federsteifigkeit von 10 N/m auf 14 N/m erhöht, dazu die Periodendauer von 1 auf 0,7 Sekunden verkürzt und die beiden Parameter lateraler Versatz von 55% und caudaler Versatz von 50% jeweils auf 40% reduziert. Wie in Abbildung 22 lässt sich auch diesmal eine Erhöhung der Geschwindigkeit ab der fünften Sekunde beobachten. Es liegt hier allerdings ein Wechsel von der Gangart Trab in die Sprunggangart Galopp vor. Ein solcher Gangartenwechsel ist nicht ausschließlich aus dem Geschwindigkeitsprofil zu entnehmen. Wie in Kapitel 2.2 bereits erläutert, werden zusätzlich die Daten prozentualer lateraler Versatz und prozentuale Bodenkontaktdauer benötigt.

Beachtet man die für das Modell getroffenen Abstraktionen und zusätzlich eventuelle Modellierungsfehler und Ungenauigkeiten in der Berechnung, lässt sich dennoch feststellen, dass durch das hohe Maß an Stabilität der jeweiligen Gangarten in der Simulation, das reale Modell zumindest zwischen einigen Gangarten variieren können wird.

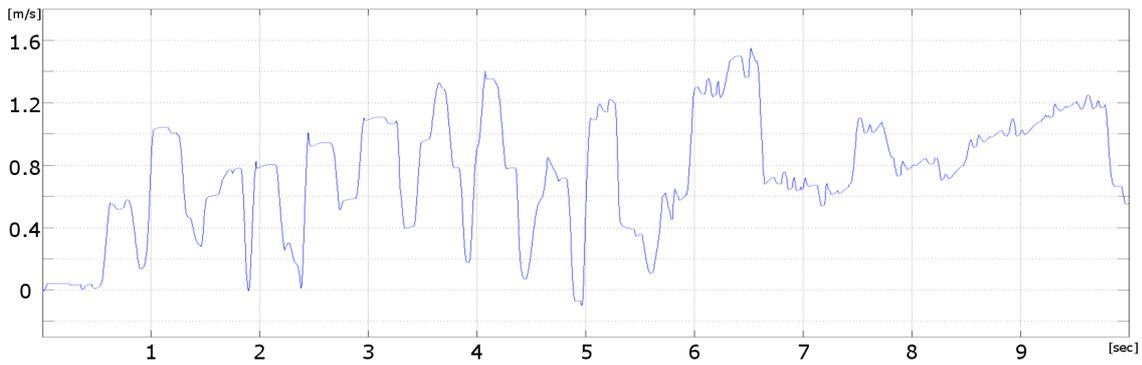


Abbildung 23.: Geschwindigkeitsänderung durch Variation aller Parameter

4.4 Emulierte Federsteifigkeit

Obwohl durch die Variation der emulierten Federsteifigkeit nur die Auslenkung des Winkels manipuliert wird und nicht die eigentlichen Eigenschaften der verbauten Feder geändert werden, ist ein Gangartenwechsel durch eine ausschließliche Änderung der emulierten Federsteifigkeit möglich. Dies zeigt ein Vergleich eines Robotersmodells, dessen verbaute Federsteifigkeiten sich tatsächlich variieren lassen mit einem weiteren Robotermodell, dessen Antriebsmodule mit emulierte Federsteifigkeit arbeiten. Zur besseren Vergleichbarkeit und um Fehler durch das Bodenkontaktmodell zu minimieren, ist die Bewegung in Tiefenrichtung bei allen im Abschnitt 4.4 durchgeführten Versuchen festgehalten. Auf den Abszissen der in Abbildung 24 dargestellten Diagramme ist die Zeit aufgetragen. Vom Startzeitpunkt 0 bis zum Zielzeitpunkt 10 wurde sowohl die tatsächliche, als auch die emulierte Federsteifigkeit linear von 4 N/m auf 16 N/m erhöht. Diagramm 3 (von oben) in Abbildung 24 zeigt die zum jeweiligen Zeitpunkt anliegende Federsteifigkeit. Die weiteren Parameter der beiden Laufroboter sind mit Periode $p = 1$ sek, lateraler Versatz $l = 30\%$ und caudaler Versatz $c = 50\%$ konstant.

Die beiden oberen Diagramme in Abbildung 24 zeigen die nach den in Kapitel 2.2 dargestellten Definitionen benötigten Indikatoren zur Bestimmung von Gangarten: den prozentual auf die Periodenlänge gerechneten lateralen Versatz (rot) und die prozentual auf die Periodenlänge gerechnete Bodenkontaktdauer eines oder beider Hinterbeine (blau). Das Diagramm 1 (von oben) zeigt dabei die Gangart des Roboters mit emulierter Federsteifigkeit, Diagramm 2 (von oben) zeigt die Gangart des Roboters mit tatsächlich variierten Federsteifigkeiten. Die bis etwa zur zweiten Sekunde dargestellten Kurven zur Hinterbeinkontaktdauer sind berechnungsbedingt nicht repräsentativ.

Zum leichteren Vergleich ist der jeweilige Wechsel zu einer Gangart mit weniger als 50% Bodenkontakt, also von einer statisch zu einer dynamisch stabilen Gangart mit einer roten (für tatsächliche Änderung der Federsteifigkeit) bzw. einer blauen (für emulierte Änderung der Federsteifigkeit) Linie markiert. Zu erkennen ist, dass der Roboter dessen Federsteifigkeiten sich tatsächlich ändern, mit einer Steifigkeit von etwa 7,5 N/m früher in eine dynamisch stabile

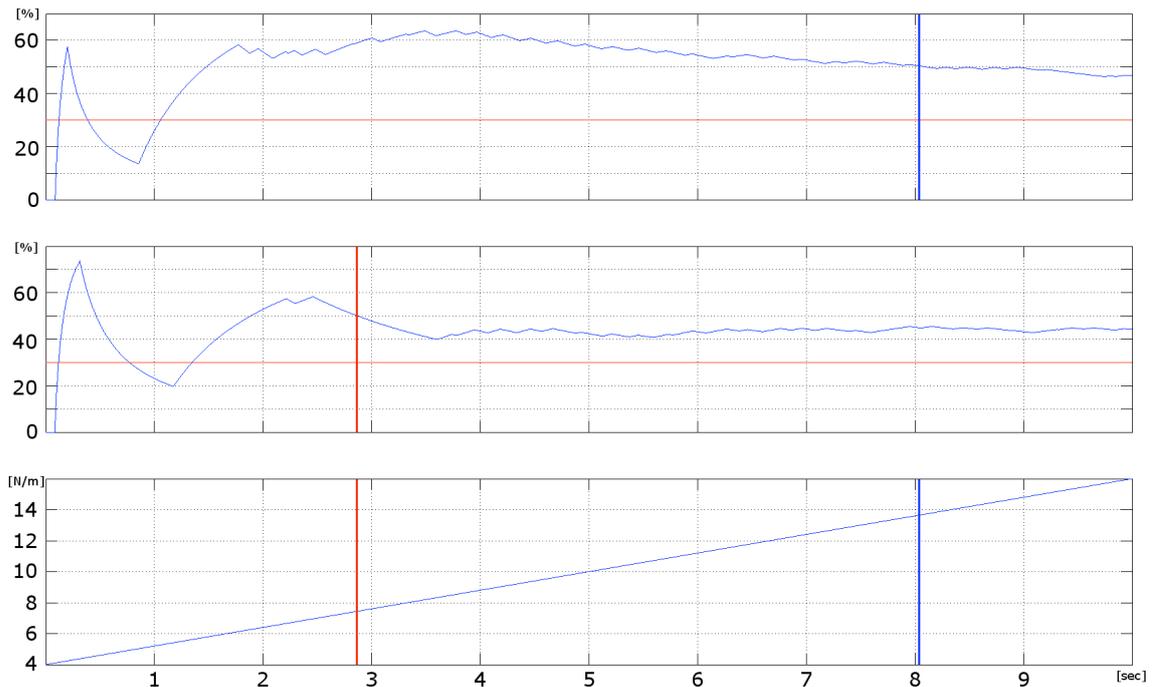


Abbildung 24.: Gangartenwechsel bei Variation der Federsteifigkeiten im Vergleich. Bei jedem Diagramm ist die Zeit auf der Abszisse aufgetragen. Sowohl die tatsächliche als auch die emulierte Federsteifigkeit wurde von 4 N/m zum Zeitpunkt 0 auf 16 N/m zur Sekunde 10 linear erhöht. Die Diagramme zeigen von oben nach unten: Gangart bei Variation der emulierten Federsteifigkeit mit lateralem Versatz (rot) und prozentualer Bodenkontaktdauer (blau), Gangart bei Variation der tatsächlichen Federsteifigkeit mit lateralem Versatz (rot) und prozentualer Bodenkontaktdauer (blau)

Gangart wechselt, als der Roboter mit emulierten Federsteifigkeiten bei einer Steifigkeit von etwa 13,5 N/m. Es lässt sich aber auch erkennen, dass nach einem Maximum bei etwa 3,5 Sekunden die prozentuale Bodenkontaktdauer der Hinterbeine des Roboters mit emulierter Federsteifigkeit kontinuierlich abfällt. Der andere Roboter zeigt nach einem Maximum bei 2,5 Sekunden eine Reduzierung auf etwa 40%, die darauf trotz weiterer Erhöhung der Federsteifigkeit nahezu konstant gehalten wird. Eine Variation zwischen verschiedenen Gangarten ist demnach durch eine ausschließliche Änderung der emulierten Federsteifigkeit möglich.

Die längere Dauer für den Wechsel der Gangart zu einer dynamisch stabilen in dem beschriebenen Versuch und die damit verbundene höhere benötigte emulierte Federsteifigkeit im Vergleich zur tatsächlichen Federsteifigkeit ist dabei kein Nachteil. Vielmehr lässt sich so durch gezieltes Ansprechen gewünschter Werte ein weiteres Spektrum stabiler Gangarten erreichen. Vergleicht man zudem noch die Geschwindigkeiten der beiden beschriebenen Robotermodelle in Abbildung 25, so lässt sich bei der emulierten Federsteifigkeit (blau) keine signifikante Abweichung vom Trend der tatsächlichen Federsteifigkeit (rot) erkennen. Betrachtet man also die Geschwindigkeit unabhängig von der Gangart bei gegebenen Randbedingungen, so sind die beiden Varianten zur Anpassung der Federsteifigkeit gleichwertig.

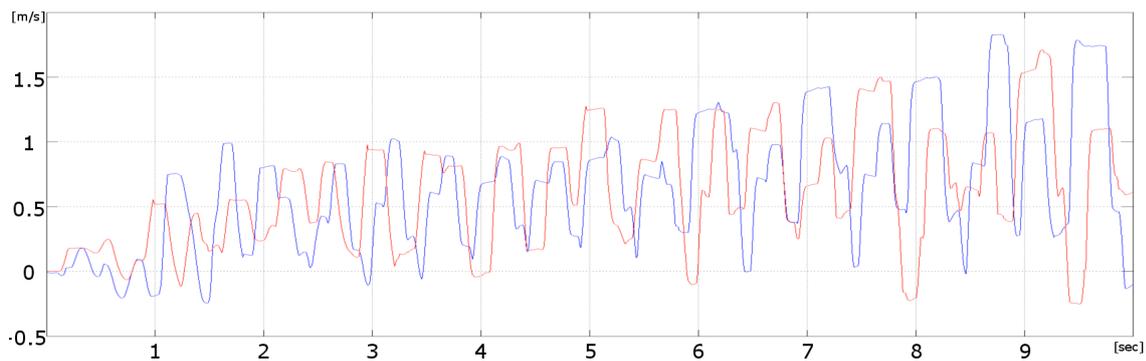


Abbildung 25.: Geschwindigkeitsvergleich bei Variation der Federsteifigkeit. Verglichen werden ein Roboter mit tatsächlich ändernder Federsteifigkeit und ein Roboter mit emulierter Federsteifigkeit. Die Steifigkeit beider Roboter wurde jeweils von 4 N/m zum Startzeitpunkt auf 16 N/m nach 10 Sekunden erhöht.

Abbildung 26 zeigt einen Vergleich der Positionen der Fußpunkte beider Modelle unter verschiedener Belastung. In beiden Diagrammen sind die Fußpunkte der Bewegung nur unter Eigengewicht¹⁸ rot dargestellt, die Bewegungen unter Eigengewicht plus 1 kg Zuladung blau. Wiederum wurde die Steifigkeit beider Modelle von anfangs 4 N/m auf 16 N/m erhöht. Das obere Diagramm zeigt dabei die Bewegung des Roboters mit tatsächlich variiertem Federsteifigkeit. Um den Vergleich einfacher durchzuführen sind in die Diagramme Begrenzungslinien eingezeichnet, die etwa die obere Grenze, also die maximale Höhe der Fußpunkte zu jedem Zeitpunkt markieren.

Es lässt sich aus Abbildung 26 ablesen, dass der Roboter mit tatsächlich variiertem Federsteifigkeit stärker auf die erhöhte Zuladung reagiert. Die Kurven der Fußpunkte des Modells mit emulierter Federsteifigkeit sind bis auf einige Ausreißer mit und ohne Zuladung nahezu identisch. Eine Anpassung der emulierten Federsteifigkeit an die jeweilige Zuladung des Roboters liegt in diesem Fall nicht vor, ließe sich aber über das bereits in Kapitel 3.4.6 erläuterte Skalar p durchführen. Über den Faktor p kann die Auslenkung der Gelenke generell erhöht werden, wie es durch eine Zuladung bei Federn mit geringerer Steifigkeit geschehen würde.

4.5 Lenkung

Die Ergebnisse zur Untersuchung der Lenkeigenschaften sind wegen der in Kapitel 3.5 beschriebenen Ungenauigkeiten des Bodenkontaktmodells nicht direkt auf das reale Modell übertragbar, zeigen aber zumindest, dass eine Lenkung über den genannten Ansatz mit den im Modell getroffenen Abstraktionen und Einschränkungen möglich ist. Abbildung 27 zeigt die gelaufene Route des Roboters gemessen am Schwerpunkt, als Draufsicht, einmal ohne Lenkeinschlag (blau) und einmal mit Lenkeinschlag (grün). Dieser erfolgt um 25 Grad nach rechts

¹⁸ Bezieht sich auf das im CAD-Modell berechnete Eigengewicht bei in Kapitel 5 vorgestellter Konfiguration

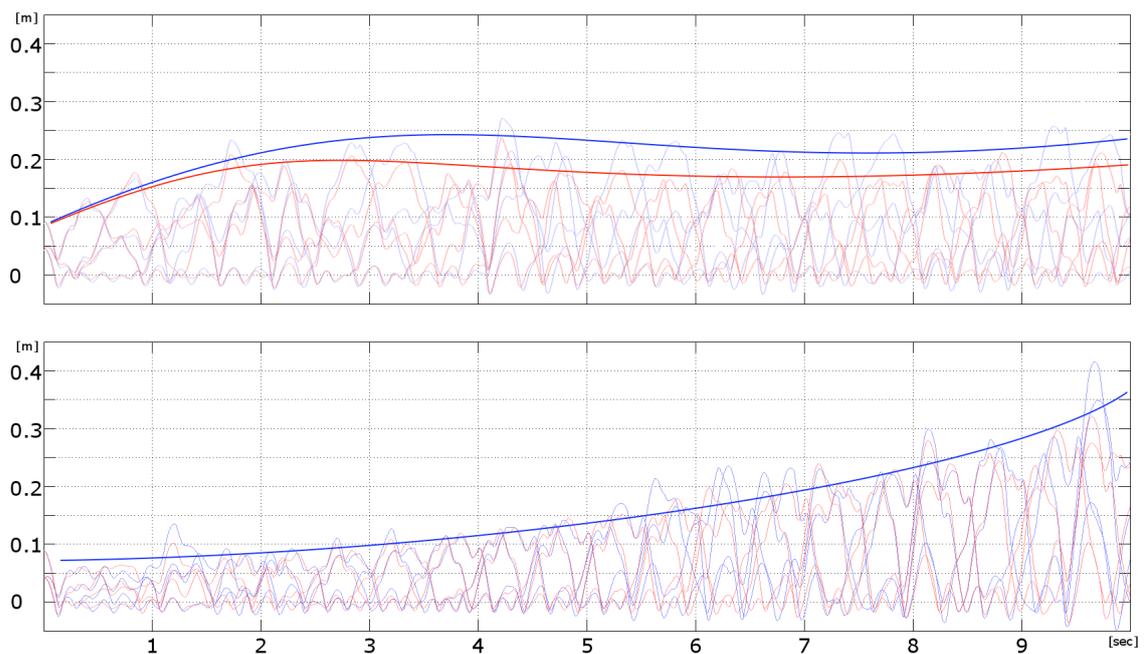


Abbildung 26.: Vergleich der Fußpunkte bei variierten Federsteifigkeit. Die Diagramme zeigen den Verlauf der jeweils vier Füße der Roboter unter Belastung durch Eigengewicht (blau) und unter Belastung durch Eigengewicht plus 1 kg Zuladung (rot). Das obere Diagramm zeigt dabei das Modell mit tatsächlich variierten Federsteifigkeiten, das untere mit emulierten Federsteifigkeiten.

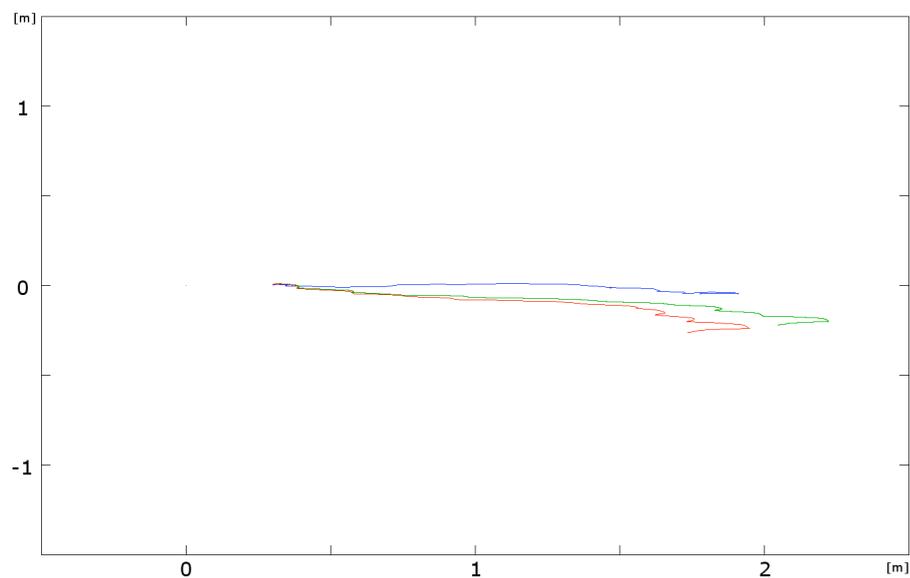


Abbildung 27.: Darstellung der gelaufenen Route bei verschiedenen Lenkeinschlägen. Die Maße sind in Metern angegeben. Die blaue Linie zeigt die Bewegung des Modells ohne Lenkeinschlag, die grüne Linie zeigt die Bewegung bei einem Lenkeinschlag von 25° . Die rote Linie zeigt die Bewegung bei einem Einschlag von 25° plus zusätzlicher Reduktion der emulierten Federsteifigkeit des vorderen rechten Beines.

bei einer Bewegung in der Gangart Trab (Periodendauer 1 Sekunde, lateraler Versatz 55%, caudaler Versatz 50%, emulierte Federsteifigkeit 7 N/m). Trotz aller getroffenen Vereinfachungen lässt sich sogar auf der kurzen abgebildeten Strecke eine deutliche Richtungsänderung erkennen. Die rote Linie zeigt die Bewegung des Modells bei zusätzlicher Reduzierung der emulierten Federsteifigkeit des beim Lenkvorgang innen liegenden rechten Vorderbeins von 7 auf 5 N/m. Sie zeigt deutlich, dass durch weitere Anpassung der Parameter die Fähigkeit Kurven zu gehen, verbessert werden kann.

4.6 Vergleich des Modells mit anderen Robotern

Betrachtet man das in dieser Arbeit entwickelte Modell und vergleicht es mit den in Kapitel 2.1 vorgestellten Robotern wird schnell deutlich, dass der von Iida und Pfeiffer entwickelte Roboterhund Puppy [30] in vielen Punkten ähnlich ist.

Ebenso wie bei dem für diese Arbeit entwickelten Roboter besitzt auch Puppy vier Beine mit jeweils drei Gliedern, von denen jedoch nur zwei angetrieben werden. Das dritte Gelenk wird passiv über einen Pantographen bewegt. Puppy benutzt jedoch elastische Pantographen, technisch realisiert durch jeweils zwei Federelemente. Die Körpergröße von Puppy beträgt in allen Dimensionen etwa die Hälfte des beschriebenen Modells.

Unterschiede zwischen den beiden Robotern finden sich vor allem in der Art des Antriebs. Wohingegen Puppy durch starre Antriebe angetrieben wird und seine Elastizität aus den elastischen Pantographen bezieht, erhält der Roboter dieser Arbeit seine Elastizität direkt aus den elastischen Antrieben. Auch ermöglicht Puppy mangels Lenkung keine Bewegung im Raum. Obwohl eine emulierte Federsteifigkeit nicht in Puppy integriert ist, ließe sich diese ohne Änderung der Morphologie hinzufügen.

Ein genereller Unterschied zeigt sich bei der Herangehensweise an die beiden Modelle. Prinzipiell orientieren sich beide Roboter an Vorbildern aus der Natur. Puppy wurde konstruiert, um daran generelle Prinzipien des beinigen Laufens zu analysieren und Erkenntnisse für weitere Roboter zu gewinnen. Der in dieser Arbeit vorgestellte Roboter hingegen benutzt diese Art von Erkenntnisgewinn bereits vor der Konstruktion.

6 Fazit und Ausblick

6.1 Fazit

Nach Abschluss der Untersuchungen und der Modellierung des CAD-Modells lässt sich bestätigen, dass die Konstruktion eines Vierbeiners, der verschiedene Gangarten beherrscht und ein dem Tier ähnliches Laufmuster aufweist theoretisch möglich ist. Sowohl ein sicherer Stand als auch eine robuste Fortbewegung des Modells werden durch die Berechnung des Simulink-Modells bewiesen, die technische Realisierbarkeit des Ansatzes beweist das CAD-Modell. Als Besonderheit lässt sich die hohe sogenannte mechanische Intelligenz des Modells hervorheben, die aus dem vollständigen Verzicht der Regelung rührt.

Über die Variation verschiedener Parameter lassen sich alle theoretisch möglichen Gangarten erreichen. Zudem bietet der Parameter „emulierte Federsteifigkeit“ die Möglichkeit, den Effekt einer geänderten Federsteifigkeit zu imitieren, ohne diese tatsächlich zu ändern. Es ist dadurch möglich, durch alleinige Variation dieses Parameters eine signifikante Änderung des Laufbildes, bis hin zum Wechsel der Gangarten zu erreichen. Außerdem lassen sich durch den Parameter „emulierte Federsteifigkeit“ verschiedene Lastfälle kompensieren. Die Bewegung im Raum wird ermöglicht durch eine der tierischen Wirbelsäule nachempfundenen Lenkung.

Es lässt sich zwar mangels fehlender alternativer untersuchter Ansätze nicht beweisen, dass der bionische Ansatz zur Erstellung des Modells die beste Möglichkeit war, allerdings lässt sich zeigen, dass er durchaus sinnvoll ist. Die Ergebnisse der Optimierung der Gliederlängen der Vorderbeine zeigen eindrucksvoll, dass die aus der Natur entnommenen Werte oft ohne weiteres übernommen werden können oder zumindest als vielversprechende Startwerte in Optimierungsverfahren dienen können. Der Gebrauch eines bionischen Ansatzes kann also nicht nur bei der Ideenfindung im Bereich der Prinzip- und Funktionsstudien, sondern auch beim Erstellen konkreter Werte hilfreich sein und die Entwicklungszeit somit in fast allen Phasen der Konstruktion reduzieren.

Eine endgültige Validierung des Simulink Modells kann erst nach der Fertigung und dem Zusammenbau des realen Modells erfolgen. Allerdings sind die simulierten Bewegungen, abgesehen von den in Kapitel 3.5 beschriebenen Unstimmigkeiten, durchaus plausibel und stimmig.

6.2 Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung zum finalen Produkt noch nicht abgeschlossen. Der logisch folgende Schritt im Anschluss an die modellbasierte Entwicklung ist die Validie-

rung der Modellgleichungen durch die Anfertigung eines realen Modells. Sind die Gleichungen validiert und gegebenenfalls korrigiert, können weitere speziellere Untersuchungen an diesen durchgeführt werden.

Bei der weiteren Entwicklung des Modells sind viele Verbesserungen denkbar. Beispielsweise bietet sich der Einsatz einer Regelung zur vereinfachten Ansteuerung und erhöhten Robustheit an. Eine Erfassung der aktuellen Geschwindigkeit und der Information, ob ein Bodenkontakt besteht oder nicht, würde zur einfacheren Ansteuerung der verschiedenen Gangarten beitragen; eine Erfassung der Lage des Roboters könnte über entsprechende Ausgleichsbewegungen zu erhöhter Stabilität führen. Ein weiteres Beispiel zur Verbesserung des Modells ist der Einsatz höherwertiger Materialien und Techniken. Der Antrieb könnte über den Einsatz von neuen muskelähnlichen Werkstoffen und Apparaten noch näher an das tierische Vorbild angepasst werden. In diesem Zusammenhang ist auch der Einsatz einer Rheobase zur Verarbeitung der Reize denkbar. Über die so eingeführte Reizschwelle könnte im Zusammenspiel mit Regelungstechnik eine kontinuierliche bionische Signalverarbeitung erreicht werden. Auch könnte der Skelettaufbau über eine detaillierte Kraftlinienanalyse und die damit verbundene bessere Werkstoffausnutzung näher an das biologische Vorbild herantreten.

Das Einsatzfeld für einen autonomen, laufenden, vierbeinigen Roboter ist wie bereits in Kapitel 1.1 ausgeführt äußerst weit. Natürlich eignet sich das entwickelte Modell nativ nicht für die genannten speziellen Einsatzgebiete, bietet aber eine Plattform die mit weiterer Entwicklung auf spezielle Problemfelder zugeschnitten werden kann. Der Roboter verfügt beispielsweise schon jetzt über eine ausreichend große Fläche zur Anbringung von Messinstrumenten. Vor allem aber die Erforschung von Bewegungsmustern und verschiedenen Gangarten lässt sich mit den Modellgleichungen und auch mit einem Prototypen durchführen.

Der Nutzen der vorliegenden Arbeit, speziell der Ergebnisse, ist aber nicht nur auf den Bau und eventuellen Einsatz eines vierbeinigen Roboters beschränkt. Einige der entwickelten Funktionen lassen sich durchaus in anderen Maschinen und Robotern einsetzen. Besonders offensichtlich ist der Einsatz von Techniken, wie beispielsweise der emulierten Federsteifigkeit, in zweibeinigen Laufrobotern.

Der Einsatz der Bionik zur Lösung eines mechanischen Problems und insbesondere zur Entwicklung einer tierähnlichen Maschine ist im Hinblick auf das Ergebnis als äußerst positiv zu bewerten. Eine verstärkte Verwendung dieser Technik ist auch in Anbetracht der dadurch verkürzten Entwicklungsdauer gerade für gewinnorientierte Unternehmen sinnvoll. Dasselbe gilt für die in vielen Bereichen bereits eingesetzte modellbasierte Entwicklung. Abschließend lässt sich in Bezug auf die Vorgehensweisen, unter Hinzuziehung der fortschreitenden Entwicklung der Computer-Hardware und der damit steigenden Realitätsnähe von Modellen, ein weiterer Anstieg des Gebrauchs derselben vorhersagen.

Literaturverzeichnis

- [1] Internationales Bionik Zentrum Stiftung für Bionik, www.bionik-zentrum.de. Februar 2009.
- [2] D. Wettergreen, C. Thorpe und R. Whittaker, Exploring mount erebus by walking robot, *Robotics and Autonomous Systems*, **11(3-4)** (1993) 171–185.
- [3] J. Bares, M. Herbert, T. Kanade, E. Krotkov, T. Mitchell, R. Simmons und W. Whittaker, Ambler: An autonomous rover for planetary exploration, *IEEE Computer*, **22(6)** (1989) 18–26.
- [4] A.L. Kemurdjian, E.K. Potiemkin und V.K. Mishkiniuk, Planet rovers today, *Proceedings of the 7th International Conference on Advanced Robotics*, (1995) 293–299.
- [5] A. Preumont, P. Alexandre, I. Doroftei und F. Goffin, A conceptual walking vehicle for planetary exploration, *Mechatronics*, **7(3)** (1997) 287–296.
- [6] J. Ayers, J. Witting, C. Wilbur, P. Zavracky, N. McGruer und D. Massa, Biomimetic robots for shallow water mine countermeasures, *Proceedings of the 4th International Conference on Technology and the Mine Problem*, (2000) 1–16.
- [7] J. Ayers und J. Witting, Biomimetic approaches to the control of underwater walking machines, *Philosophical Transactions of the Royal Society, Series A*, **365(1850)** (2007) 273–295.
- [8] M. Konaka, National project on advanced robot technology in japan, *Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Robotics*, (1991) 24–30.
- [9] W. Cox. Big Muskie. Tech. rep., Ohio State University, 1970.
- [10] J.M. Roberts, P.I. Corke und G.J. Winstanley, Development of a 3500-tonne field robot, *The International Journal of Robotics Research*, **18(7)** (1999) 793–752.
- [11] Y. Mae, A. Yoshida, T. Arai, K. Inoue, K. Miyawaki und H. Adachi, Application of locomotive robot to rescue tasks, *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2000) 2083–2088.
- [12] C. DeBolt, C. O'Donnell, C. Freed und T. Nguyen, The BUGS 'basic UXO gathering system' project for UXO clearance & mine coutermeasures, *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1997) 329–334.
- [13] S. Hirose und K. Kato, Development of quadruped walking robot with the mission of mine detection and removal - proposal of shape-feedback master-slave arm, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1998) 1713–1718.

-
- [14] W.C. Flannigan, G.M. Nelson und R.D. Quinn, Locomotion controller for a crab-like robot, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1998) 152–156.
- [15] P. Koenig und G.A. Bekey, Generation and control of gait patterns in a simulated horse, *Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1993) 359–366.
- [16] R. Müller, Die Physik des Gehens als Unterrichtsgegenstand, *Naturwissenschaften im Unterricht*, **1+2/05** (2005) 40–48.
- [17] E. Dittrich, Kontrollstrategien für den Gangartwechsel zwischen Gehen und Laufen am Beispiel des Masse-Feder Templates. Diplomarbeit, TU Ilmenau, 2005.
- [18] E. Muybridge, *Animals in motion* (Chapman & Hall 1899).
- [19] A. Melchinger und E.U. Schmitz, Schneller und effizienter in der Entwicklung durch Simulation und Optimierung, *Symposium SSimulation in der Produkt. und Prozessentwicklung*, (2003) 149–157.
- [20] H. Cruse, J. Dean, U. Müller und J. Schmitz, The stick insect as a walking robot, *Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Robotics*, (1991) 936–940.
- [21] F. Pfeiffer, J. Eltze und H.J. Weidemann, The TUM-walking machine, *Intellegent Automation and Soft Computing*, **1(3)** (1995) 307–323.
- [22] T. Kerscher, J. Albiez, J.M. Zoellner und R. Dillmann, Airinsect-a new innovative biological inspired six-legged walking machine driven by fluidic muscles, *Proceedings of the 8th Conference on Intellegent Autonomous Systems*, (2004) 3–10.
- [23] M.B. Binnard, *Design of a Small Pneumatic Walking Robot*. Diplomarbeit, Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [24] G.M. Nelson und R.D. Quinn, Posture control of a cockroach-like robot, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1998) 157–162.
- [25] G.M. Nelson, R.D. Quinn, R.J. Bachmann, W.C. Flannigan, R.E. Ritzmann und J.T. Watson, Design and simulation of a cockroach-like hexapod robot, *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1997) 1106–1111.
- [26] Boston Dynamics, Big Dog - The Most Advanced Quadruped Robot on Earth. <http://www.bostondynamics.com/content/sec.php?section=BigDog>, August 2009.
- [27] H. Kimura, S. Akiyama und K. Sakurama, Realization of dynamic walking and running of the quadruped using neural oscillator, *Autonomous Robots*, **7(3)** (1999) 247–258.
- [28] H. Kimura, Y. Fukuoka und H. Katabuti, Mechanical design of a quadruped tekken 3&4 and navigation system using laser range sensor, *Proceedings of the 10th International Symposium on Robotics*, (2005) 1–6.

-
- [29] Kimura Lab, Kimura Lab, Robotics & Roboto Locomotion, Kyoto Institute of Technology. <http://robotics.mech.kit.ac.jp/>, Februar 2009.
- [30] F. Iida und R. Pfeifer, "cheap"rapid locomotion of a quadrupde robot: Self-stabilization of bounding gait, *Intelligent Autonomous Systems*, **8** (2004) 642–649.
- [31] Sony, Aibo Support Homepage. <http://support.sony-europe.com/aibo/index.asp>, Februar 2009.
- [32] M.W. Hardt, M. Stelzer und O. von Stryk, Modellierung und Simulation der Dynamik des Laufens bei Roboter, Tier und Mensch, *thema Forschung*, **2** (2002) 56–63.
- [33] M.F. Silva und J.A.T. Machado, A historical perspective of legged robots, *Journal of Vibration and Control*, **13** (2007) 1447–1486.
- [34] E. Z. Moore, D. Campbell, F. Grimminger und M. Buehler, Reliable stair climbing in the simple hexapod rhex, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2002) 2222–2227.
- [35] R.J. Full und M.S. Tu, Mechanics of a rapid running insect: Two-, four- and six-legged locomotion., *Journal of Experimental Biology*, **156(1)** (1991) 215–231.
- [36] G.A. Bekey, *Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)* (Mit Pr2005).
- [37] A. Thorstensson und H. Roberthson, Adaptions to changing speed in human locomotion: Speed of transition between walking and running, *Acta Physiologica Scandinavica*, **131(2)** (1987) 211–214.
- [38] M. Hildebrand, Symmetrical gaits of horses, *Science*, **150** (1965) 701–708.
- [39] Dr. Nancy Nicholson, *BioMechanical Riding & Dressage*, Dissertation, 2006.
- [40] S. Wolf und G. Hirzinger, A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation, *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2008) 1721–1746.
- [41] R. van Ham, B. Vanderborght, M. van Damme, B. Verrelst und D. Lefeber, MACCEPA: the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator for 'controlled passive walking', *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2006) 2195–2200.
- [42] US Patent US2007267791(A1), Adjustable stiffness jack spring actuator. Published 2007, Filed 2005.
- [43] A. Albu-Schäffer, S. Haddadin, Ch. Ott, A. Stemmer, T. Wimböck und G. Hirzinger, The DLR lightweight robot - design and control concepts for robots in human environments, *Industrial Robot: An International Journal*, **34, 5** (2007).

-
- [44] U. Simon, Biomechanische Prinzipien des Knochenbaus, *Skriptum zur Vorlesung Grundlagen der Biomechanik 2*, Universität Ulm, (2009) 44–47.
- [45] N.A. Campbell, J.B. Reece und J. Markl, *Biologie* (Pearson Studium 2006).
- [46] Fraunhofer-Gesellschaft, Hannover Messe, Künstliche Knochen aus dem Computer. <http://www.fraunhofer.de/presse/presseinformationen/2006/03/Mediendienst32006Thema5.jsp>, Februar 2009.
- [47] H. Schürmann, *Skriptum zur Vorlesung Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, TU Darmstadt, 1+2 (2008).
- [48] H. Schürmann, *Skriptum zur Vorlesung Konstruktiver Leichtbau*, TU Darmstadt, 1+2 (2008).
- [49] M. Ruoss, Künstliche Muskeln: Biologisch inspirierte Konstruktion und Funktionalität, *New AI Seminar*, (2004).
- [50] Fluidic Muscle DMSP/MAS Produktbeschreibung, FESTO, <http://www.festo.com>.
- [51] C. Schilling und D. Riemer, Von Muskeln und Motoren - Zur Bionik der Bewegungssysteme, *BioKon Standort Ilmenau*, (2002) 1–7.
- [52] Dynamixel AX-12 User's Manual 2006-06-14, Robotis, <http://www.robotis.com>.
- [53] S. Klug und T. Lens, Verbundprojekt BioRob. <http://www.biorob.de>, August 2009.
- [54] Sebastian Klug, Thomas Lens, Oskar von Stryk, Bernhard Möhl und Andreas Karguth, Biologically inspired robot manipulator for new applications in automation engineering, *Proceedings of Robotik 2008*, (2008).
- [55] R. Anderl, CAD-Systeme und CAx-Prozessketten, *Skriptum zur Vorlesung Produktdatentechnologie*, TU Darmstadt, A (2005).
- [56] H. Witte, M.S. Fischer, N. Schilling, W. Ilg, R. Dillmann, M. Eckert und J. Wittenburg, Konstruktion vierbeiniger Laufmaschinen anhand biologischer Vorbilder, *Konstruktion*, 9 (2000) 46–50.
- [57] Dynamixel RX-64 User's Manual 2009-05-29, Robotis, <http://www.robotis.com>.
- [58] S.L. Hooper, Central pattern generators, <http://www.els.net>, (2001).
- [59] V. Storch und U. Welsch, *Kükenthal Zoologisches Praktikum* (Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg - Berlin 1999).
- [60] R. Tausch, Optimization of a bionic-inspired, underactuated, flexible Walking Machine with SimMechanics on Matlab/Simulink. Diplomarbeit, TU Darmstadt, 2006.
- [61] C. Darwin, Über die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl oder Die Erhaltung der begünstigten Rassen im Kampfe ums Dasein (John Murray, London 1859).