

Konstruktion und Steuerung von Schreitrobotern mit ballistischem Laufverhalten

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von M.Sc. Yuriy Zavgorodniy

geb. am 2. Mai 1979 in Awdeewka (Ukraine)

genehmigt durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz-Ulrich Seidel

Prof. Dr. sc.techn. Ulrich Schmucker

Promotionskolloquium am 2. April 2009

Abstrakt

Mobile Schreitroboter finden immer häufiger Einsatz im industriellen Umfeld, bei Serviceaufgaben, bei planetaren Erkundungen, im Haushalt usw. Trotz intensiver Forschungen auf diesem Gebiet gibt es weiterhin eine Reihe offener Fragen, die die Entwicklung einer robusten und gleichzeitig flexiblen, mechatronischen Konstruktion, echtzeitfähiger Steuerungssysteme sowie energieoptimierte Bewegungsabläufe betreffen.

Von besonderem Interesse sind dabei anthropomorphe, zweibeinige Roboter. Einerseits eignen sich diese am besten für den Einsatz in einer von Menschen bewohnten Umgebung und finden damit erhöhte Akzeptanz im gemeinschaftlichen Zusammenleben. Andererseits tragen mobile Schreitroboter zum besseren Verständnis des menschlichen Gehens bei und ermöglichen dadurch die Weiterentwicklung von Mechanismen wie medizinischer Prothesen und Exoskeletten.

Mobile Schreitroboter verfügen entsprechend ihrer biologischen Vorbilder über eine komplexe mechanische Struktur mit mehreren Freiheitsgraden. Die koordinierte und aufgabenspezifische Ansteuerung aller Freiheitsgrade ist eines der Hauptziele im Bereich der Schreitrobotertechnik.

Die vorliegende Arbeit widmet sich der systematischen Entwicklung mechatronischer Strukturen mobiler Schreitroboter sowie der Entwicklung von Steuerungssystemen und Bewegungsalgorithmen für deren Gleichgewichtserhaltung. Besonderer Wert wird auf die Entwicklung von Methoden zur Generierung ballistischer Bewegungen von komplexen mechanischen Systemen am Beispiel von zweibeinigen, mobilen Robotern gelegt, die zur wesentlichen Vereinfachung des Steuerungskonzeptes führen und das wissenschaftliche Ziele dieser Arbeit bilden.

Zum Nachweis der Wirksamkeit der vorgeschlagenen Steuerungsmethoden und Regelungsalgorithmen wurden außerdem folgende technische Ziele definiert:

- Entwurf und Realisierung/Implementierung von mechatronischen Konstruktionen und Steuerungssystemen für einen zweibeinigen, mobilen Roboter ROTTO sowie einen sechsbeinigen, mobilen Roboter ANTON;
- simulative und experimentelle Erprobung der vorgeschlagenen Methode zur Generierung ballistischer Bewegungen am zweibeinigen, mobilen Roboter ROTTO unter Verwendung von hybriden Simulationstechniken.

Die entwickelten mobilen Schreitroboter ANTON und ROTTO sind in den Abb. 0.1 und 0.2 dargestellt.

Beide Roboter verfügen über mehrere aktive Freiheitsgrade, die über ein vernetztes Antriebsystem geregelt werden. Die elektrischen Antriebe sind sehr effizient im Bezug auf Kosten, Energieverbrauch und Leistungsdichte ausgelegt. Die integrierte Sensorik erfasst alle zur Lokomotion notwendigen Informationen, wie Körperkonfiguration, Orientierung im Gravitationsfeld, mechanische Kontaktkräfte sowie stereoskopische Videoinformation.

Die Roboterkonstruktionen, die im Rahmen dieser Arbeit entworfen wurden, zeichnen sich durch einfache aber dennoch für Lokomotionsaufgaben ausreichende Kinematiken mit optimalen Verhältnissen und größtmöglichen Arbeitsbereichen aus. Sowohl die mechanische Struktur als auch das hierarchische Steuerungssystem beider Roboter sind modular aufgebaut.

Der einem Insekt ähnliche sechsbeinige Roboter ist in der Lage neben den einfachen Lokomotionsaufgaben auch wesentlich komplexere Serviceaufgaben zu bewältigen.

Der zweibeinige Roboter berücksichtigt weitestgehend die anthropomorphen Verhältnisse und ist in der Lage Aufgaben, wie das hochdynamische Gehen, Laufen, Kniebeugen, Aufstehen usw., autonom durchzuführen.

Die sechsbeinigen bzw. zweibeinigen, mobilen Prototypen stellen somit solide Testplattformen für verschiedene Steuerungs- und Regelungsstrategien dar, die für zukünftige Arbeiten in diesem Bereich verwendet werden können.

Zu den wichtigsten Ergebnissen der vorliegenden Arbeit gehört der experimentelle Nachweis der Funktionsfähigkeit der erarbeiteten Methode zur Generierung der ballistischen Bewegungstrajektorien für ein komplexes mechanisches System, wie es der zweibeinige, mobile Schreitroboter ROTTO darstellt.



Abb. 0.1 – Sechsbeiniger mobiler Roboter ANTON

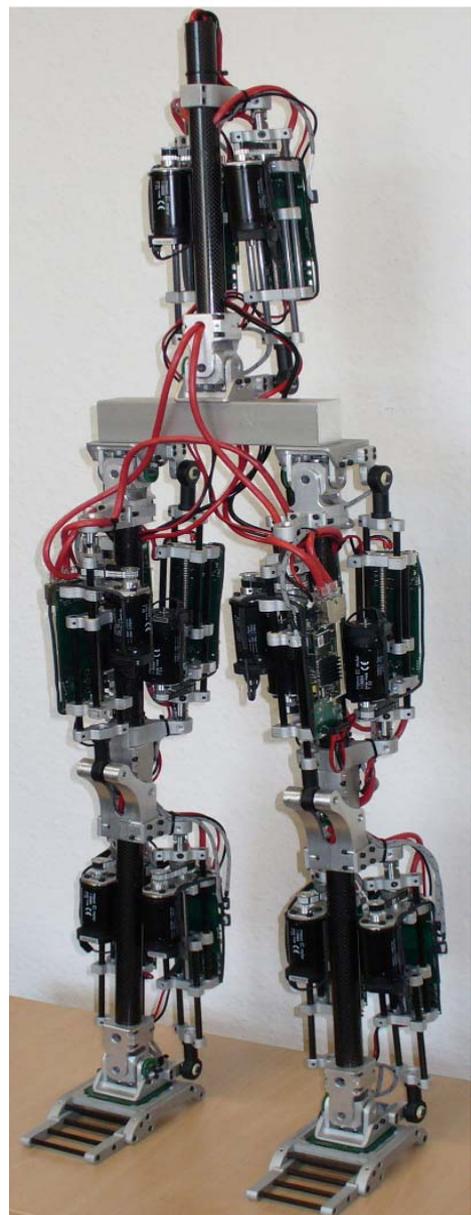


Abb. 0.2 –Zweibeiniger mobiler Roboter ROTTO

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am Institut für Elektrische Energiesysteme der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis für die großzügige Unterstützung und das stete Interesse sowie für die intensive Betreuung dieser Arbeit. Prof. Palis hat sich ferner sehr stark für die persönlichen Interessen der Doktoranden eingesetzt.

Einen großen Meilenstein dieser Arbeit legten die Projekte „Multisensorielle Verfahren zur Bewegungssteuerung sechsbeiniges Schreitroboters“ und „xRob – Intelligente Aktorik und sensorik für Einsatz in mobilen Roboter“ zugrunde. Die Projekte liefen am Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung Magdeburg als ein Teil des von der DFG initiierten interdisziplinären Schwerpunktprogramms „Autonomes Laufen“ und als ein ProINNO Projekt der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF).

Den Herrn Dr. sc. techn. Ulrich Schmucker und Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis möchte ich für die allseitige Unterstützung bei der Durchführung der Projekte und bei der Entwicklung der Prototypen meinen besten Dank aussprechen.

Beim Herrn Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Hilscher möchte ich mich verbindlichst für die enge Zusammenarbeit und großzügige Unterstützung bei der Realisierung der Kommunikationssysteme bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. habil. Anatoli Schneider, Dr.-Ing. Vadym Rusin, M.Sc. Mykhaylo Konyev, M.Sc. Andrej Telesh, M.Sc. Andrej Melnikov und M.Sc. Artem Rudskyy für die langjährige und fruchtbare Zusammenarbeit, für die zahlreichen Diskussionen und in erster Linie, für das freundliche Arbeitsklima.

Schließlich möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Frau Nataliya und meinen Eltern für die langmütige Unterstützung während der Promotionszeit bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
1.1	Einführung	1
1.2	Herausforderungen der Bewegungssteuerung	2
1.3	Stand der Forschung	3
1.3.1	Mehrbeinige mobile Roboter	4
1.3.2	Zweibeinige mobile Roboter	6
1.3.3	Analyse existierender Steuerungskonzepte	9
1.4	Ziel und Aufbau der Arbeit	12
2	Entwurf mechatronischer Komponenten für mobile Roboter	14
2.1	Konzept zur mechatronischen Entwicklung der Konstruktion	14
2.1.1	Auswahl der Gelenkstruktur	17
2.1.2	Auslegung der Roboterparameter	19
2.1.3	Analyse und Realisierung der Antriebstechnik	20
2.2	Konstruktive Umsetzung des sechsbeinigen mobilen Roboters ANTON	25
2.2.1	Gesamtaufbau	26
2.2.2	Kniegelenk	28
2.2.3	Schultergelenk	29
2.3	Konstruktive Umsetzung des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO	30
2.3.1	Gesamtaufbau	31
2.3.2	Hüftgelenk	32
2.3.3	Kniegelenk	33
2.3.4	Sprunggelenk und Fuß	34
2.4	Technische Daten der Roboterkonstruktion	36
2.5	Kraftsensoren	38
2.5.1	Der 6-Komponenten Kraft-/Drehmomentsensor	39
2.5.2	Der 3-Komponenten Kraftsensor	44
2.5.1	Realisierung und Verifikation der Kraftsensoren	45
2.6	Zusammenfassung	48
3	Entwurf und Aufbau des Steuerungssystems	49
3.1	Hybride Simulationstechniken und Rapid Control Prototyping	49
3.2	Struktur und Komponenten des Steuerungssystems	52
3.2.1	Übersicht relevanter Steuerungsarchitekturen	53
3.2.2	Zentralrechner	56
3.2.3	Kommunikationssystem	57
3.2.4	Dezentrale Controller	58
3.2.5	Inbetriebnahme	61
3.3	Zusammenfassung	65
4	Generierung der Raumbewegungen für mobile Roboter	66
4.1	Modellbildung und Simulation mobiler Roboter	69
4.1.1	Kinematische Zusammenhänge	69
4.1.2	Bewegungsgleichungen nach Newton-Euler	73
4.2	Allgemeine Darstellung der ballistischen Raumbewegungen	80
4.2.1	Grundlagen der ballistischen Trajektorien	81
4.2.2	Eigenschaften der ballistischen Trajektorien	87
4.2.3	Zusammenfassung	90
4.3	Generierung einer ballistischen Bewegung für komplexe mechanische Systeme	91
4.3.1	Definition der Randbedingungen	91
4.3.2	Auswahl eines hierarchischen Modellsystems	92

4.3.3	Lösung der ballistischen Aufgabe für komplexe mechanische Systeme	94
4.4	Zusammenfassung	100
5	Gleichgewichterhaltung	101
5.1	Bodenbezugspunkte in der Roboterbewegung	102
5.1.1	Zero-Moment-Point	103
5.1.2	Berechnung und Erfassung der ZMP Position	105
5.2	Voraussetzungen und Randbedingungen für Gleichgewichterhaltung	109
5.2.1	Drehimpulserhaltung	111
5.2.2	CMP – Centroidal Moment Pivot	114
5.2.3	FRI – Foot Rotation Indicator	116
5.3	Gleichgewicht und Ballistik	120
5.4	Zusammenfassung	125
6	Experimentelle und Simulationsergebnisse mit dem zweibeinigen mobilen Roboter ROTTO	126
6.1	Beschreibung der Testplattform	127
6.2	Gleichgewichterhaltung beim Stehen	128
6.2.1	Stehen mit beiden Beinen	128
6.2.2	Stehen auf einem Bein	130
6.3	Ballistische Bewegung des zweibeinigen Roboters ROTTO	136
6.3.1	Messung	136
6.3.2	Bildsequenz: ballistische Bewegung	139
6.4	Zusammenfassung	141
7	Zusammenfassung und Ausblick	142
7.1	Zusammenfassung	142
7.2	Ausblick	145
A	Technische Daten und Parameter	146
	Abkürzungsverzeichnis	154
	Literaturverzeichnis	155

Kapitel 1

Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Einführung

Mehr als die Hälfte der Erdoberfläche ist für traditionelle Räder- und Raupentransportmittel unpassierbar. Gleichzeitig können sich die Tiere und Menschen durch den größten Teil dieser Gebiete fortbewegen. Das Bedürfnis nach bodengebundenen Fortbewegungsmitteln mit hoher Geländegängigkeit ließ das Interesse nach Entwicklung von Laufmaschinen entstehen.

Aus dem Blickwinkel der Profilbefahrbarkeit bietet eine Laufmaschine hohen Komfort des Lasttransportierens. Darüber hinaus ist eine charakteristische Hindernisgröße, die eine Laufmaschine überwinden kann, vergleichbar mit der Größe der Laufmaschine, indem sie für Rad- und Raupentransportmittel in Größenordnung des Radradius oder der Raupenhöhe ist. Die Bodenbefahrbarkeit der Räder- und Raupentransportmitteln ist durch zwei Faktoren begrenzt. Zum einen besteht eine begrenzte Bodentragfähigkeit und zum zweiten ein zunehmender Bewegungswiderstand durch den Stütztiefgang der Räder bzw. der Raupen.

Die Implementierung der schreitenden Mechanismen setzt voraus, dass ein entsprechend leistungsfähiges Steuerungssystem zur Verfügung steht, das die Bearbeitung der Sensorinformation und die koordinierte Steuerung mehrerer Freiheitsgrade mit vorgegebenen Gütekriterien bewältigt.

Die Fortschritte im Bereich der Rechentechnik haben die Entwicklung von hochintelligenten Steuerungssystemen sowie der Schreitrobotik selbst intensiviert. Die Forschungsaktivitäten nahmen hierbei rasant zu. Oft treten die biologischen Prototypen (Insekten, Säugetieren, Menschen) als natürliche Vorbilder für künstliche Mechanismen auf. Die Untersuchung des Bewegungsverhaltens von natürlichen Vorbildern hilft bei der Entwicklung von Steuerungsalgorithmen für mobile Roboter. Andererseits erleichtert die Entwicklung der Laufmaschinen das Verständnis der Funktionsweise in der Natur.

Im technischen Gerät wird die Güte des Systems (z.B. Zuverlässigkeit, Geschwindigkeit, Präzision) von dem schwächsten Element bestimmt und ist im allgemeinen Fall geringer als die entsprechenden Eigenschaften einzelner Bestandteile. Dagegen ist die Güte der „lebenden“ Systeme generell höher als die entsprechenden Eigenschaften einzelner Komponenten. So können die „lebenden“ Systeme auch nach erheblichen Verletzungen weiter funktionieren, obwohl die Zuverlässigkeit der einzelnen Komponente (Zellen) gering ist. Diese Systeme sind zwar mit relativ „langsamen“ Komponenten aufgebaut, können aber

verschiedene Aufgaben (z.B. Objekterkennung) viel schneller und effizienter lösen als moderne Rechner. Schließlich erfolgt in solchen Systemen (was besonders bei Bewegungsaufgaben wichtig ist) eine gegenseitige Korrektur der Fehler der einzelnen Gelenke, so dass die Präzision des gesamten Systems höher als die Präzision der Einzelteile ausfällt. Somit ist das Ziel der Roboterentwicklung unter anderem, neue Zusammenhänge und Konzepte zur effizienten Gestaltung einer Maschine zu finden und zu erforschen.

Obwohl eine Vielzahl von Forschungsarbeiten an mehrbeinigen Robotern geführt werden, sind die Forschungsarbeiten an zweibeinigen anthropomorphen Mechanismen von größtem Interesse geblieben. Diese Problematik ist interessant und wichtig, einerseits für das Verständnis von menschlichem Gehen und andererseits für die Implementierung solcher Mechanismen wie Prothesen, Exoskeletten und autonomen zweibeinigen Robotern.

Eine der Hauptaufgaben im Bereich des anthropomorphen Gehens ist die Entwicklung von Algorithmen zur Bewegungssteuerung. Das Skelettsystem muss viele Freiheitsgrade für die Generierung komplizierter koordinierter Bewegungen beherrschen. Versuche, menschliche Bewegungsabläufe mit hoher Genauigkeit zu reproduzieren, führen insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Steuerung/Regelung zu extrem komplizierten dynamischen Systemen. Die stabile Bewegung des Menschen wird durch gezielte Verwendung von ca. 400 Skelettmuskeln realisiert.

Da das gesteuerte Objekt ein komplexes mechanisches System mit mehreren aktiven bzw. passiven Freiheitsgraden darstellt, werden auch mehrere Aufgabenlösungen angeboten. Man unterscheidet zwischen den klassischen Methoden, die sich auf dem parametrischen Modell des Objektes beruhen und den Methoden der künstlichen Intelligenz. Es existiert allerdings keine universelle Methode. Alle bis dato vorgeschlagene Konzepte besitzen sowohl Vorteile als auch spezifische Nachteile. Die Entwicklung von Steuerungsalgorithmen, die die Vorteile von einzelnen Methoden kombinieren und die Nachteile überwinden, ist die wichtige und aktuelle Aufgabe im Bereich der Schreitrobotertechnik.

1.2 Herausforderungen der Bewegungssteuerung

Angesichts der großen Anzahl existierender Roboterprototypen ist der relativ langsame Fortschritt in der Entwicklung von Steuerungskonzepten als ein integrierter Bestandteil des Robotersystems bemerkenswert.

Ein erstes Problem wird in der *Koordinierung der Gelenke* gesehen. Mobile Schreitroboter sind typischerweise Maschinen mit mehreren Freiheitsgraden. Dagegen ist die Lokomotion – Verschiebung des Massenmittelpunktes des Roboters – eine Aufgabe mit relativ kleiner Anzahl von Freiheitsgraden. Demnach kann z. B. die Aufgabe der horizontalen Bewegung des Massenmittelpunktes des Roboters nicht eindeutig die Bewegung der einzelnen Glieder definieren. Da mehrere Lösungen existieren, ist es schwierig, eine „gute“ und nahezu unmöglich, eine „optimale“ Lösung zu finden.

Das zweite Problem besteht in der hybriden Art der Roboterdynamik. Der Roboter bewegt sich während der Lokomotion über mehrere Phasen des Bewegungszyklus wie Fuß aufsetzen oder aufheben, Anstoß und Abrollen der Ferse. Die Prozesse wie Anstoß und Kontaktnahme sowie variablen Kontakteigenschaften erfordern dabei die Einbeziehung komplizierter hybrider Modelle. Es existieren allerdings wenige Konzepte für die Regelung solcher hybriden Systeme.

Ein weiteres Problem bereiten die ungesteuerten Freiheitsgrade während der Bewegung. Im Gegensatz zu fest mit der Umgebung verbundenen konventionellen Industrierobotern, sind mobile Roboter relativ zur Umgebung beweglich. Wegen der endlichen Größe der Füße kann der Roboter durch ein großes Drehmoment im Fußgelenk über den Fußrand rollen, wobei ein ungesteuerter Freiheitsgrad entsteht. Die entsprechenden Drehmomentengrenzen wirken sich auf die Komplexität der Steuerungsalgorithmen aus.

Die hybride Natur der Robotersysteme und ungesteuerte Freiheitsgrade erfordern für die komplette Beschreibung der Roboterdynamik die Berücksichtigung der einseitigen Bindungen. Die Roboterbeine haben keine feste Bindung zur Lauffläche; damit können die Reaktionskräfte im Kontakt nur in eine Richtung wirken. Des Weiteren müssen die Reaktionskräfte im Reibkegel liegen, damit die Füße nicht gleiten. Wenn der Fuß flach zur Oberfläche aufgesetzt werden muss, soll auch unter dem Fuß ein Zero Moment Point (ZMP) existieren, der ebenfalls mit einseitigen Bindungen beschrieben werden kann.

Während bestimmter Phasen der Bewegung kann der mobile Schreitroboter sich im Allgemeinen außerhalb des Bereichs der statischen Stabilität befinden. Dabei liegt die Projektion des Massenmittelpunktes auf einer Fläche außerhalb des Stützpolygons des Roboters. In diesem Fall kann das populäre ZMP-Konzept nicht mehr verwendet werden und die dynamische Stabilität des Roboters muss dann mit weiteren Regelungskonzepten sichergestellt werden.

Einen besonderen Fall stellt die Aufgabe der Drehimpulserhaltung des Massenmittelpunktes des Roboters während der Flugphase beim Laufen dar. Bedingt durch die Drehimpulserhaltung ist es nicht möglich, während der Flugphase die absolute Lage und Konfiguration des Roboters unabhängig zu steuern. Das erschwert die Stabilisierung der Konfiguration des Roboters beim Aufsetzen.

1.3 Stand der Forschung

Trotz intensiver Forschungen auf dem Gebiet der Entwicklung von anthropomorphen Robotern (z.B. DFG SPP „Autonomes Laufen“) existiert noch eine Reihe von offenen Fragen, die insbesondere die Entwicklung von echtzeitfähigen Steuerungsalgorithmen betreffen, die eine menschenähnliche Gangart realisieren. Neben optischen Gesichtspunkten spielen hierbei vor allem auch energetische Gesichtspunkte eine entscheidende Rolle.

Zurzeit werden weltweit eine Vielzahl von Forschungsarbeiten an anthropomorphen Robotern unterschiedlicher Formen und Zwecke durchgeführt. Schon jetzt existieren hoch funktionelle Prototypen, die zu stabilen komplizierten Raumbewegungen auf der Grundlage von modernen Steuerungssystemen fähig sind [1-3]. Die Entwicklung und Untersuchung von solchen Prototypen sind nicht nur von theoretischem Interesse. Sie liefern darüber hinaus auch wesentliche Erkenntnisse für den Roboterentwurf in den unterschiedlichsten Bereichen, wie beispielsweise Serviceroboter für kontaminierte/unzugängliche Umgebungen oder medizinische Hilfsroboter bzw. Exoskelette.

Unter praktischen Gesichtspunkten ist jedoch beim heutigen Stand der Technik eine koordinierte Steuerung eines stark verkoppelten Systems mit ca. 400 geregelten Freiheitsgraden technisch nicht beherrschbar [4, 5] und praktisch auch nicht notwendig. Infolgedessen beschränkt sich das Problem der Erforschung von autonomen Schreitmaschinen und insbesondere von anthropomorphen Robotern auf Untersuchungen der grundlegenden Lokomotionsfunktionen [6]. Dazu gehört das Gehen über eine ebene Oberfläche mit vorher

bekanntem Hindernissen oder das Überwinden einer unebenen komplizierten Oberfläche. Hierfür werden jedoch lediglich vereinfachte Roboterstrukturen eingesetzt. Dadurch ist es möglich, die Zahl der Freiheitsgrade des Stützapparates auf eine beherrschbare Größe zu reduzieren. Trotz dieser Vereinfachungen ist eine effektive Steuerung derartig reduzierter Systeme bereits mit großen Schwierigkeiten verbunden. Der Einsatz herkömmlicher Steuerungsmethoden zur Generierung der künstlichen Lokomotion ist nicht in der Lage, das menschliche Gangverhalten in der notwendigen Qualität zu modellieren. Hier ist der Einsatz unkonventioneller Methoden notwendig, die die spezifischen Eigenschaften der Lokomotion berücksichtigen [7, 8].

1.3.1 Mehrbeinige mobile Roboter

Angesichts des technischen Fortschritts in der Rechentechnik wurden bereits vor vierzig Jahren die Maschinen entwickelt, die die Beine als Fortbewegungsmittel verwendeten. Aus Stabilitätsgründen waren solche Laufmaschinen mit mehreren Beinen ausgestattet (in der Regel sechs oder acht). Die Steuerungssysteme wurden so aufgebaut, dass zu jedem Zeitpunkt mindestens drei Beine im Kontakt mit der Oberfläche sind und ein großes Stützpolygon bilden. Wenn der Massenmittelpunkt der Maschine innerhalb des Stützpolygons bleibt, ist die Maschine statisch stabil. Für den statisch stabilen Gang war eine einfache Vorgabe der festen Bewegungstrajektorien ausreichend und man konnte bereits mit einfacher Regelungstechnik stabile Fortbewegung gewährleisten.

Mit erfolgreichen Gehversuchen wurde ein neues Kapitel in der Geschichte der Robotertechnik geschrieben – Service Robotik. Bereits Anfang der 1990er Jahre haben die Carnegie Mellon Universität und die NASA versucht mit Dante I und Dante II die Vulkane in der Antarktis zu erforschen und Gasproben zu sammeln. Die jüngste Entwicklung der NASA – ein hybrider sechsbeiniger Rad/Bein Roboter namens ATHLETE – käme als mobile Plattform für Planetenmissionen in Betracht. [9]

Die hydraulisch betriebene sechsbeinige Maschine ASV wurde in den 1980er Jahren von Song und Waldron für die Untersuchung von Steuerungsgrundlagen von Laufmaschinen gebaut. Ein Verbrennungsmotor ermöglichte die autonome Arbeit der 3,2 Tonnen schweren und 5 Meter langen Maschine. [10]

Das finnische Unternehmen Pulsetech hat 2005 einen ebenfalls hydraulisch betriebenen Waldharvester auf sechs Beinen vorgestellt. Mit der Möglichkeit das Gewicht zwischen allen Beinen zu verteilen richtet die Maschine weniger Schaden im Wald an als herkömmliche Maschinen und hatte eine wesentlich höhere Manövrierfähigkeit auf unebenem Untergrund [11].

Die Laufmaschine Tarry [12] wurde in Kooperation zwischen der Universität Duisburg und dem Labor von Cruse an der Universität Bielefeld entwickelt. Der Aufbau des Roboters Tarry entspricht mit seinen Beinlängen und Anordnung der Gelenke dem von Stabheuschrecken im Maßstab von 1:10. Mit dem Ziel einer wesentlichen Vereinfachung der Steuerungskonzepte von Laufrobotern wurde die Steuerungsstruktur von Tarry soweit wie möglich der von Stabheuschrecken nachgebildet. Ein weiteres Ziel bestand darin, die Fähigkeiten von Stabheuschrecken, große Lücken überwinden zu können, auch auf den Roboter zu übertragen. Dazu wurden auch neuartige Sensorkonzepte, wie insektenartige Fühler zur Abtastung der Umgebung, entwickelt und untersucht.

Die Laufmaschine LAURON wurde ebenfalls nach Vorbild einer Stabheuschrecke am Forschungszentrum Informatik (FZI) in Karlsruhe entwickelt [13], um daran stabiles Laufen in unebenem Gelände zu untersuchen. Die Arbeiten hatten zum Ziel mit Hilfe unterschiedlicher Sensorsysteme, die nicht nur den Zustand der Maschine erfassen, sondern auch eine lokale Beschreibung der Umwelt liefern, eine lokale Navigation in sehr rauem, unstrukturiertem Gelände zu ermöglichen. Zur Erfassung von Umweltparameter wurde ein Stereo-Kamerasystem entwickelt, das mit Hilfe von strukturiertem Laserlicht in Echtzeit eine einfache Bestimmung des Bodenprofils durchführt.

In Kooperation mit Biologen der Universität Jena und dem Mechatronik Institut der Universität Duisburg werden die Steuerungsalgorithmen für die vierbeinige, säugetierartige Laufmaschine BISAM entwickelt [14]. Das Ziel der Arbeit ist es, mit Hilfe von biologischen Erkenntnissen und einer Simulation der Dynamik eines Mehrkörpersystems eine flexible und adaptive Steuerungsarchitektur bis hin zur Verhaltenssteuerung zu entwickeln. Als zentrales Element dieser Architektur sind kleine hierarchisch miteinander verschaltete Steuerungskomponenten, sogenannte "Reflexe", entwickelt worden. Realisiert werden diese Reflexe sowohl unter Verwendung von neuronalen Netzen (trainiert mit einem Reinforcement Learning - Verfahren), als auch durch Fuzzy-Controller, die wiederum durch Reinforcement- Ansätze optimiert werden.

Während die meisten Roboter mit Hilfe von Elektromotoren angetrieben werden, wird bei AirBug jedes Gelenk von zwei pneumatischen künstlichen Muskeln bewegt. Dies erfordert zwar ein aufwändiges Steuerungssystem, ermöglicht aber viele neue Eigenschaften. Der biologische Muskel stellt einen Aktuator mit einer hohen Stellkraft- und Geschwindigkeit, einem geringen Leistungsgewicht und einem integrierten Feder-Dämpfungssystem dar. Die sechsbeinige Laufmaschine AirBug wurde in Kooperation mit dem Pneumatik Spezialisten FESTO entwickelt. Ein antagonistisches Muskelpaar, das jedes Gelenk antreibt, ermöglicht die Regelung der Position, des Drehmoments und der Steifigkeit. Das resultiert in einem weicheren und schonenden Gang.

An die Bauweise von Skorpionen lehnt sich der achtbeinige Roboter Scorpion von der Universität Bremen an. Mit einem zusätzlichen Beinpaar erreicht man die notwendige Flexibilität beim Überwinden von Hindernissen. Es werden zunächst nur die Vorderbeine ertastet. Die sechs verbleibenden Beine sorgen dabei für eine stabile Position. Das Steuerungssystem im Scorpion ist in kleinere lokale Einheiten aufgeteilt, die sich nur mit der rhythmischen Ansteuerung einzelner Beine beschäftigen; ein weiterer Prozessor wertet dabei die Daten von Sensoren aus und steuert das gesamte System auf übergeordneter Ebene. Das jeweilige Bein wird von einem lokalen Prozessor gesteuert und bildet ein autonomes, geschlossenes und anpassungsfähiges System.

Eines der führenden Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet von Laufmaschinen ist das MIT Leg Lab. Hier wurden viele erstaunliche Laufmaschinen gebaut. Es sind vor allem die springenden Maschinen von Raibert (aus den 1980er Jahren) und Pratt (Ende der 1990er Jahre) [15, 16] die das Steuerungssystem für komplexe Maschinen in überschaubare Komponenten teilten und die Steuerung der ganzen Maschine anhand eines virtuellen vereinfachten Modells ermöglichten.

Aus dem MIT Leg Lab ist die Firma Boston Dynamics hervorgegangen, die unter anderem eine vierbeinige Laufmaschine namens BigDog entwickelt hat. Der 75 Kilogramm schwere Vierbeiner BigDog stellt einen großen Schritt in der Entwicklung der Laufmaschinen dar. Mit dem BigDog wurde ein komplexes Problem der Auswahl der Stützpunkte für die Beine

während des Laufens gelöst. Der BigDog ist in der Lage die Entscheidung über Platzierung der Füße in Echtzeit zu treffen um die Stabilität sicher zu stellen. Allerdings existieren nur wenige Veröffentlichungen über das Steuerungssystem dieser Maschine [17].

Die Entwicklung von Laufmaschinen an der Universität Magdeburg hat eine langjährige Geschichte und beruht auf der Kooperation mit dem Fraunhofer Institut im Magdeburg. Inspiriert von dem sechsbeinigen Roboter Masha [18], wurde die Laufmaschine Katharina am Fraunhofer Institut [19] zur Untersuchung von Sensorsysteme und adaptiven Schreitalgorithmien entwickelt. In Rahmen der nachfolgenden Arbeiten entstanden im Magdeburg die sechsbeinigen Roboter SLAIR [20], SLAIR2 [21] und ANTON [22] welche von einer Generation zur anderen wesentlich mehr Funktionalität und Performance lieferten und viele neue experimentelle Untersuchungen ermöglichen. An diesen Prototypen wurden neue Ideen in den Bereichen Designparadigmen, Systemorganisation und Steuerung geprüft. Weiterhin wurde das Problem der Kontaktnahme und der Regelung der Beinimpedanz während der Wechselwirkung zwischen dem Bein und der Oberfläche untersucht [23-25]. Jetzige Arbeiten konzentrieren sich auf die Anwendung intelligenter Steuer- bzw. Regelungsalgorithmien zur Realisierung einer gewünschten Roboterinteraktion mit der Umgebung [26].

1.3.2 Zweibeinige mobile Roboter

Obwohl die Geschichte der Entwicklung der zweibeinigen mobilen Roboter bis in die sechziger Jahre zurückführt, widmen sich in den letzten Jahren viele Forscher den Fragen der Entwicklung leistungsfähiger Roboterprototypen sowie effizienter Steuerungssysteme und der Analyse des zweibeinigen Gehens. Die entwickelten Prototypen und Forschungsrichtungen können dabei in zwei große Gruppen unterteilt werden. Die mobilen schreitenden Roboter, die sich nur unter dem Einfluss der Schwerkraft fortbewegen („*passive walking*“), bilden erste Gruppe. Die motorisch angetriebenen mobilen Schreitroboter („*powered walking*“) brauchen dagegen die Energie einer externen Quelle, um eine Bewegung zu erzeugen.

Das Interesse für passives Gehen ist durch die hohe Energieeffizienz dieses Ansatzes und das „natürliche“ Aussehen des Bewegungsablaufs begründet. Die Energieverluste durch mechanische Reibung oder Stöße der Füße gegen den Untergrund beim Gehen werden im passiven Roboter durch die potentielle Energie einer geneigten Lauffläche kompensiert.

Ein flacher, passiver Roboterprototyp mit nur vier Gliedmaßen wurde von McGeer [27, 28] Ende der 1980er Jahre gebaut, um eine detaillierte Analyse der Stabilität durchzuführen und den Einfluss der Parameter zu untersuchen. Mit einer speziellen Vorrichtung zum Blockieren der Kniebeugung und mit abgerundeten Füßen, um einen abrollenden Kontakt zu ermöglichen, erreichte der 3.5 kg schwere und 0.5 m große Prototyp von McGeer einen stabilen Gang mit einer Geschwindigkeit von 0.4 m/s auf einer Oberfläche mit 1.4° Gefälle. In ähnlichen Versuchen wurden von Garcia, Ruina und Chatterjee [29] die Eigenschaften des passiven Ganges untersucht und bestätigt. Goswami und andere [30] haben Ende neunziger Jahre einen so genannten „*compass gait walker*“ untersucht. An einem einfachen flachen Mechanismus mit nur zwei Gliedmaßen und prismatischen Beinen wurde durch Anlegen eines Drehmoments zwischen Beinen und Regelung der Gesamtenergie des Roboters die Möglichkeit der Erweiterung des Bereichs des stabilen Ganges demonstriert. Durch Änderung der Nachgiebigkeit des Standbeins eines ähnlichen Prototyps mit abgerundeten Füßen hat van der Linde [31] die Möglichkeit untersucht, die Aufprallgeschwindigkeit des Beines mit der Oberfläche zu reduzieren. Eine dreidimensionale Version von McGeers passivem Schreitroboter wurde Ende der 1990er Jahre von Collins [32] gebaut. Ein sorgfältig entwickelter 4.8 kg schwerer und 0.85 m großer Prototyp besaß pendelähnliche Arme und

erreichte eine Geschwindigkeit von 0.5 m/s. Aktuelle Arbeiten [33, 34] widmen sich der Entwicklung und Analyse von dynamischen Eigenschaften dreidimensionaler Modelle mit bis zu zehn Freiheitsgraden.

Obwohl die Untersuchung der Eigenschaften des passiven Ganges ein wichtiger und interessanter Forschungsbereich ist, braucht jeder Roboter, der irgendwann für praktische Zwecke eingesetzt werden muss, Energie. Außerdem gehören zu den Nachteilen der „passiven Roboter“ eine begrenzte Reichweite und Anzahl der erzielbaren Bewegung sowie eine nur begrenzte Stabilität der Bewegung.

Die meisten entwickelten Prototypen der zweibeinigen Roboter werden mit Hilfe elektrischer, seltener pneumatischer und hydraulischer Antriebe, bewegt. Aufgrund der externen Energiezufuhr sind viele Roboter nicht komplett autonom. Wenige Prototypen, die eine eigene Energiequelle in Form von Batterien oder Druckluft mitführen, haben lediglich sehr begrenzte Autonomie, wobei die Laufzeit aktuell bei ca. 30-60 Minuten liegt.

Einer der ersten Prototypen des zweibeinigen mobilen Roboters, der in der Lage war, sich relativ stabil fortzubewegen, war der bereits 1972 an der Waseda-Universität in Japan von Kato und Tsuki gebaute Roboter WL-5 [35]. Die Waseda-Universität hat eine umfangreiche Geschichte der Entwicklung und Forschung des zweibeinigen Gehens. Mitte der 1980er Jahre hat dieselbe Gruppe den dreidimensionalen, 80 kg schweren zweibeinigen Roboter WL-10RD [36] gebaut, der mit zwölf angetriebenen Freiheitsgraden eine Geschwindigkeit von 0.1 m/s erreichte. Weitere japanische Forschungsgruppen entwickelten und untersuchten in den 1980er und 1990er Jahren mehrere flache und dreidimensionale Prototypen, wie z.B. Biper-1 bis Biper-5 von Miura und Shimoyama [37] oder der flache, 23 kg schwere und 0.7 m große Kenkyaku von Furusho and Masubuchi [38]. Dieser kam mit nur vier Antrieben im Knie- bzw. Hüftgelenk aus und erreichte eine Geschwindigkeit von bis zu 0.8 m/s. Kajita und Tani entwickelten Meltran II, einen flachen zweibeinigen Roboter mit sechs Freiheitsgraden [7, 40], der mit einer Geschwindigkeit von 0.2 m/s kleine Hindernisse überwinden konnte. Der in den 2000er Jahren an der Waseda-Universität gebaute 107 kg schwere WABIAN und später der optimierte, 65 kg schwere WABIAN-2 mit bis zu 52 Freiheitsgraden setzten weitere Meilensteine der Entwicklung humanoider Roboter.

Einer der meistbekanntesten zweibeinigen Roboter heute ist der von Honda Motor Co. entwickelte ASIMO-Roboter. Der ASIMO ist 43 kg schwer, 1.2 m groß und besitzt 26 Freiheitsgrade. Komplett autonom, kann der Roboter nach letzten Berichten nicht nur gehen, wenden und Treppen steigen, sondern auch mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h laufen. Seit Mitte der 1980er Jahre basierte die Entwicklung von ASIMO auf der Erfahrung von zehn Prototypengenerationen (Serie E0 bis E6 und P1 bis P3) und sie wird bis heute fortgesetzt. Allerdings sind nur wenige Veröffentlichungen in Bezug auf Steuerungsalgorithmen von ASIMO bekannt [1, 2].

Das aktuell von der japanischen Regierung gestartete Humanoid Robot Projekt (HRP) hilft dabei, den japanischen Markt der Service-Roboter in den Aufwind zu bringen. Ein Erfolg dieses Projekts stellt der bereits mehrfach produzierte Prototyp HRP-2 dar, ein dreidimensionaler, 58 kg schwerer, 1.54 m großer Roboter mit 30 Freiheitsgraden, der von mehreren Forschungsgruppen als Testplattform benutzt wird [43, 44].

Erfolgreiche Versuche der japanischen Kollegen haben in den 1990er Jahren ein großes Interesse zur Erforschung des zweibeinigen Gehens in Europa und in den USA geweckt. Die Arbeitsgruppe von Pratt am MIT Leg Lab hat den flachen, 14 kg schweren und 1.2 m großen

zweibeinigen Roboter Spring Flamingo [45-47] gebaut. Der Roboter wurde mit Hilfe von neuartigen elektrischen Antrieben mit in Reihe geschalteter elastischer Federn angetrieben und konnte eine Geschwindigkeit von 1.2 m/s erreichen [48]. Später wurde am MIT der robuste, dreidimensionale, zweibeinige Roboter M2 mit zwölf Freiheitsgraden entwickelt. Gesteuert ebenfalls von elektrischen Antrieben mit elastischen Elementen, konnte der 28 kg schwere Roboter auf zwei Beinen balancieren [49]. Über erfolgreiche Gehversuche wurde allerdings nicht berichtet.

Unterstützt durch einen Forschungsschwerpunkt "Autonomes Laufen" der DFG wurde an der TU München der zweibeinige Roboter Johnnie gebaut. Der Roboter ist 1.80 m groß, wiegt 45 kg und verfügt über 19 elektrisch angetriebene Gelenke. Ein primäres Ziel der Forscher war es, mit dem Roboter nicht nur Gehen, sondern auch Joggen zu realisieren. Vorgestellt auf der Hannover Messe 2003, konnte Johnnie mit einer Geschwindigkeit von 2.4 km/h gehen und Hindernisse überwinden [3, 52-54]. Die bei der Entwicklung, dem Bau und während der Versuche mit der zweibeinigen Roboter Johnnie gewonnenen Erkenntnisse legten wertvolle Grundsteine für die Weiterentwicklung des Systems in Form des humanoiden Roboters LOLA, der im Rahmen des DFG-Paketantrags "Natur und Technik intelligenten Laufens" gebaut wird [55-56], um die Gang- bzw. Laufgeschwindigkeit von bis zu 5 km/h zu erreichen.

Eine Forschungsgruppe am französischen Centre national de la recherche scientifique (CNRS) [50] hat Ende 1990er Jahre einen flachen, 32 kg schweren, 1.2 m großen, zweibeinigen Roboter RABBIT gebaut. Die mit lediglich vier Freiheitsgraden ausgestattete Maschine diente als Testplattform bei der Überprüfung verschiedener Regelungskonzepte [39, 51].

Ausgehend von dem flachen zweibeinigen Roboter BART-UH wurde an der Universität Hannover der dreidimensionale Roboter LISA entwickelt [57]. Bestehend aus Beinen und Torso, kann der Roboter autonom gehen und dient als Versuchsträger für die Weiterentwicklung und Erprobung neuer Regelungsverfahren zur Stabilisierung und Bahnplanung. Eine Besonderheit bei diesem Roboter stellt die kugelgelenkähnliche Konstruktion der Hüftgelenke [58] dar, die unter anderem eine bessere Steifigkeit und Ausnutzung der Motorkraft erlaubt.

Koreanische Forscher haben, unterstützt von Regierungsprogrammen, in den letzten Jahren vorbildlichen Ergebnisse in der Forschung und Entwicklung humanoider Roboter gezeigt [59, 60]. Die am Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) entwickelten Roboter der KHR-Serie sind in der Lage einen stabilen Gang, die Überwindung von Hindernissen, sowie die Interaktion mit der Umgebung zu demonstrieren.

Die hier dargelegte Analyse der existierenden Arbeiten widmet sich an erster Stelle den mit Beinen ausgestatteten Prototypen, die die Lokomotion als primäres Forschungsziel ausprägen. Es existiert jedoch eine große Anzahl von Projekten, in denen das Forschungsobjekt einen humanoiden Oberkörper darstellt. In diesen Projekten wird großer Wert auf die intelligente Durchführung von Serviceaufgaben und auf die Interaktion mit der Umgebung und mit Menschen gelegt. Hier stellen z.B. Prototypen wie ARMAR von der FZI Karlsruhe [61], DOMO von der CSAIL Humanoid Robotics Group am MIT [62] oder der zweiarmige humanoide Robot-Oberkörper JUSTIN des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt [63] sehr interessante Ergebnisse vor. Das aktuelle europäische Projekt RobotCub [64] widmet sich der Untersuchung kognitiver Denkprozesse durch den Aufbau des einem zwei Jahre alten Kindes ähnelndem Roboters iCub. Durch die offene Plattform können viele Wissenschaftler verschiedener Forschungsrichtungen zusammenarbeiten.

Eine internationale Initiative zur Förderung der Forschung in den Bereichen „künstliche Intelligenz“ und „autonomer mobiler Roboter“ stellt der RoboCup-Wettbewerb dar. Seit 1997 findet mit dem Ziel der Förderung des Austausches kreativer Ideen und der Weiterentwicklung der Robotersysteme jährlich eine RoboCup-Weltmeisterschaft statt. Dabei werden neben dem Testfeld Fußball die Ergebnisse auch bereits in Wettbewerben für Rettungsroboter in Katastrophenszenarien und für Roboter im Haushalt getestet [65].

1.3.3 Analyse existierender Steuerungskonzepte

Die Steuerungskonzepte mobiler Roboter können in zwei große Klassen eingeteilt werden: in fest programmierte und anpassungsfähige (adaptive). Die fest programmierten Systeme werden auf die Parameter der a priori bekannten Umgebung eingestellt und sind bei unbekanntem bzw. teilweise unbekanntem Verhältnissen nicht funktionsfähig. Anpassungsfähige Systeme enthalten in der Regel selbst anpassende Strukturen wie z.B. umschaltbare Regelkreise oder künstliche neuronale Netze, die viele mögliche Steuerungsgesetze realisieren können.

Es kann davon ausgegangen werden, dass in einer Reihe von Arbeiten [66-69] Probleme der inversen Dynamik von Modellen des menschlichen Körpers erfolgreich gelöst wurden. In diesen Arbeiten werden die generalisierten Gelenkkräfte anhand von Aufnahmen menschlicher Bewegungen mit mehrgliedrigen Modellen hinreichend genau bestimmt und auch der Energieverbrauch für die betrachteten Bewegungen ausgewertet [66, 70].

In [4, 72-75] wird ein Verfahren verwendet, das die halb-inverse und inverse Methode zur Steuerung eines zweibeinigen Roboters nutzt. Bei der ersten Methode werden die Bewegungen einiger Gelenke vorgegeben und die Bewegung der restlichen Gliedmaßen wird mit Hilfe der Periodizitätsbedingungen berechnet [73]. In diesem Fall ist es möglich, die notwendigen Sollbewegungen in allen Gelenken zu finden. Bei der zweiten Methode [73, 75] wird die Bewegung aller Gelenke des Roboters in Form einer Zeitfunktion mit unbekanntem Parametern vorgegeben. Hierbei werden auch Funktionen betrachtet, die für die menschliche Bewegung uncharakteristisch sind. Die endgültigen Sollbewegungen werden dann nach der Optimierung einer Funktion berechnet, die beispielsweise den Energieverbrauch während der Bewegung kennzeichnet. Auf diese Weise erfolgt eine parametrische Optimierung [73].

Zur Lösung von Steuerungsproblemen in der Robotertechnik werden häufig Methoden des analytischen Reglerentwurfs unter Beachtung der Steuer- und der Beobachtbarkeit sowie auch des Frequenzspektrums der offenen und geschlossenen Regelkreise verwendet. In den Arbeiten [71, 76] wird diese Methode zur Lösung des Steuerungs- und Stabilitätsproblems beim zweibeinigen Gehen verwendet. Zur Vereinfachung werden die Bewegungsgleichungen in diesen Arbeiten häufig linearisiert. Ein Teil der Arbeiten betrachtet darüber hinaus das Problem der Stabilisierung des zweibeinigen grundsätzlich instabilen Roboters [15, 71, 77].

Die Aufgabe der Bewegungssteuerung des zweibeinigen Gehens kann prinzipiell mit Hilfe der Variationsrechnung gelöst werden. Die hohe Ordnung des Systems und die Nichtlinearitäten der Bewegungsgleichungen verursachen jedoch erhebliche Schwierigkeiten. Die hohe Ordnung der Differentialgleichung ist durch die vielen Freiheitsgrade und die unterschiedliche Struktur in den Einzel- und Doppelstützphasen bedingt. Dieses Problem bereitet nicht nur bei Variationsrechnung Schwierigkeiten sondern erschwert auch die Anwendung anderer Optimierungsverfahren.

Methoden der Momentberechnung in den Gelenken von zweibeinigen Robotern anhand ihres dynamischen Modells (computed torque) wurden in [3, 52-54] betrachtet. Als vereinfachtes Modell des Roboters für die Ermittlung der Solltrajektorien wird ein inverses Pendel benutzt. Die Steuerung erfolgt auf drei Ebenen. Die obere Ebene reguliert die globale Bewegungskoordination. Hier werden die übergeordneten Zielfunktionen wie Gangart, Richtung, Geschwindigkeit ausgewählt. Die mittlere Ebene plant die Schrittphasen und erzeugt die Gelenktrajektorien ohne Verlust des Kontaktes. Die optimierten Schrittparameter werden aus einer Datenbank ausgewählt. Die Regelung aller Sollbewegungen erfolgt auf der unteren Ebene und berücksichtigt und korrigiert durch entsprechende Rückkopplungen alle dynamischen Effekte. Die hierfür notwendigen Gelenkmomente werden auf der Basis eines komplexen dynamischen Modells des gesamten Roboters unter Echtzeitbedingungen berechnet.

Eine effektive Steuerung des Roboters kann mit Hilfe von komplexen Neuro-Fuzzy Systemen [42] aufgebaut werden. Sie sind in der Lage, das komplizierte dynamische Verhalten des Roboters zu modellieren. Derartige selbst lernende und adaptionsfähige Systeme können die Roboterdynamik ohne komplizierte Bewegungsgleichungen online lösen [78]. Die Netze können sogar mit einem vereinfachten Modell des Systems antrainiert werden. In der Arbeit [41] bilden beispielsweise drei künstliche neuronale Netze (KNN) ein sehr wirkungsvolles Steuerungssystem, das in einem weiten Arbeitsbereich funktioniert und unterschiedliche Parameter des Schrittzklus (Länge, Höhe und Periode) einstellt. Wenn die Bewegung nicht ideal ist, untersucht der Roboter das notwendige Verhalten und ändert seine Parameter, um die Bewegung aus einer stabilen Stellung zu starten und um wieder in eine stabile Stellung zu kommen.

In einigen Arbeiten [80-82] haben intellektuelle Steuerungsmethoden Anwendung gefunden, die während der Phase der ballistischen Bewegung trainiert werden. Es werden Netze von Cerebellar Model Articulation Controllern (CMAC) genutzt, um die 7 Gelenke des Roboters anhand des voraus berechneten Schrittzklus zu steuern. In der Arbeit [41, 79] werden CMAC zur Steuerung der Hüftgelenke während der Doppelstützphase verwendet. Ein Hauptvorteil dieser Systeme liegt darin, dass sehr genaue Bewegungsabläufe reproduziert werden können. Nachteilig wirkt sich jedoch ihre relativ lange Trainingszeit aus.

In den Arbeiten [4, 5, 83] wird gezeigt, dass der Fuß des Roboters indirekt durch Steuerung seiner gesamten Dynamik geregelt wird. Daraus wird gefolgert, dass die auf der Oberfläche wirkende Reaktionskraft, d. h. ihre Amplitude und Richtung sowie ihr Angriffspunkt (zero moment point, ZMP) die entscheidenden Kriterien für den dynamischen Zustand des Roboters sind. Das Prinzip des ZMP [84] wird für die Steuerung sowohl zweibeiniger [85-89] als auch mehrbeiniger Roboter praktisch eingesetzt. In der Arbeit [90] wird die Anwendungsmöglichkeit des ZMP für die Analyse der Stabilität und Steuerung des Gangprozesses eines Menschen für Rehabilitationszwecke demonstriert. Die Lage des ZMP lässt sich zweckmäßig als dynamisches Kriterium für die Analyse der Stabilität und Generierung der Bewegung anthropomorpher Roboter nutzen. Ein Robotersystem wird dabei in vielen Ansätzen durch ein vereinfachtes lineares inverses Pendel Modell (LIPM) beschrieben. Unter Berücksichtigung der Programmtrajektorien der unteren Extremitäten (Methode der vorgegebenen Synergie [83, 84, 90]) können nach der Bestimmung der Lage des ZMP (halb-inverse Methode [84, 90]) die notwendigen Kräfte zur Stabilisierung des Roboterganges ermittelt werden. Kapitel 5 stellt eine weiterführende Analyse der Rolle und Anwendung verschiedener Bodenbezugspunkte bei der Erhaltung des Gleichgewichts des Roboters.

Ebenfalls von Interesse sind Methoden der ballistischen Bewegungssteuerung. Die Bewegung des anthropomorphen Roboters wird hierbei nicht vorgegeben, sondern lediglich die gewünschte Roboterkonfiguration, d. h. die Randbedingungen der einzelnen Bewegungsachsen am Anfang und am Ende des Schrittes. Die Steuerfunktion für das Gehen wird in diesem Fall in Form einer impulsförmigen Zeitfunktion bestimmt. In den Arbeiten [91, 92] wird gezeigt, dass der Muskelaktivität während der Bewegung eine Phase der Muskelentspannung folgt. Hierbei ist die Muskelaktivität im Vergleich zum gesamten Lokomotionszyklus [66, 70] durch einen relativ kurzen Zeitabschnitt gekennzeichnet. Diese Form der Bewegung führt zu einer Minimierung des Muskelenergieverbrauchs [70]. Dabei erfolgt die Bewegung des Beines nahezu ausschließlich durch die Schwingkraft (ballistische Bewegung) [27, 28, 31]. Diese ballistischen „Flugbahnen“ können mit Hilfe von Steuerimpulsen, die in kurzen Zeitabschnitten angelegt werden, in den gewünschten Verlauf überführt werden [93]. Ideale Impulse (Delta-Funktionen) ändern die Geschwindigkeiten der Gelenke sprungartig und gestatten somit theoretisch die Realisierung beliebiger Geschwindigkeitsverläufe. In den Zeiten zwischen zwei Impulsen erfolgt die Bewegung als freie Bewegung (ballistische Trajektorie).

In realen Systemen ist es jedoch praktisch unmöglich, die gewünschten Geschwindigkeiten der einzelnen Achsen sprungartig zu ändern [93]. Die Hauptgründe hierfür sind antriebspezifische Begrenzungen, Trägheit und die Elastizität der Roboterkonstruktion. Infolgedessen unterscheidet sich die reale Roboterbewegung erheblich von der theoretischen. Das führt zu den Abweichungen von den Solltrajektorien und kann sogar den Verlust der Stabilität nach sich ziehen. Aus diesem Grunde ist es notwendig, die programmgesteuerten theoretischen Solltrajektorien über ein lokales anpassungsfähiges Steuerungssystem zu korrigieren.

Die Untersuchungen [94-96] zeigen, dass die ballistische Bewegung viele Vorteile besitzt. Da jedoch die Impulssteuerung (Delta-Funktionen) praktisch nicht realisiert werden kann, müssen Steuerungsmethoden für reale, praktische Anwendungen entwickelt werden. Bei der Steuerung von anthropomorphen Robotern erhebt sich aus der Sicht der Mechanik eine Reihe von theoretischen Fragen. Bedingt durch die Tatsache, dass bei Gehen Einzelstütz- und Doppelstützphase ständig wechseln, ist es notwendig, Probleme der Kontaktnahme und des Kontaktverlustes sowie der Interaktion des Roboters mit der Umgebung näher zu untersuchen. Kopplungen, die während des Kontaktes zwischen dem Stützbein und der Oberfläche entstehen, können als nichtholonome, einseitige Kopplungen betrachtet werden und es können hierfür Berechnungsmethoden der nichtholonomen Mechanik verwendet werden.

Eine ausführliche Analyse der oben dargestellten Arbeiten und weiterer Quellen [97, 99-103] zur Steuerung zweibeiniger Roboter lässt den Schluss zu, dass ein Defizit in der Entwicklung effektiver Methoden zur Steuerung mehrgliedriger anthropomorpher Roboter besteht. Viele Methoden sind praktisch schwer umsetzbar und/oder für den Echtzeitbetrieb nicht geeignet [85, 104]. Daraus resultiert die Notwendigkeit, Verfahren und Algorithmen zu entwickeln, die die Vorteile der unterschiedlichen Methoden kombinieren und ihre wesentlichen Nachteile minimieren. Hervorgehoben werden muss, dass fast alle vorgeschlagenen Methoden und Algorithmen entweder an mathematischen Modellen oder an realen Robotern mit externen Energiequellen untersucht wurden, bei denen der Energieverbrauch nicht begrenzt war. Für autonome mobile Roboter spielen jedoch unter praktischen Bedingungen ihre Energieversorgung und der sparsame Umgang mit den begrenzten Energieressourcen eine entscheidende Rolle.

Es ist offensichtlich, dass die Kräfte und Momente der Interaktion des Fußes mit dem Untergrund von den mechanischen Parametern und der Geometrie des Untergrundes [23-25, 105, 106] sowie auch von der Roboterbewegung abhängen. Folglich ist ihre a priori Berechnung unmöglich und die nachfolgenden Steuerungsimpulse für die Erzeugung einer effektiven ballistischen Trajektorie werden falsch berechnet. Zur Lösung dieses Problems müssen lokale „intelligente“ Regler eingreifen, die die aktuellen mechanischen Umgebungseigenschaften anhand zurückliegender Information abschätzen und eine zusätzliche Kraft- bzw. Positionskorrektur [23-25] unter Gewährleistung der erforderlichen Körperhaltung, der gesamten Stabilität sowie auch des minimal möglichen Energieverbrauchs zu erzeugen.

1.4 Ziel und Aufbau der Arbeit

Der dargestellte Stand der Forschung macht ersichtlich, dass die Anwendung der ballistischen Theorie zur Erzeugung der energieoptimalen Programmbewegungen aller Bewegungsachsen sehr effektiv zur Steuerung anthropomorpher Roboter erscheint. Allerdings sind derzeitige Forschungsaktivitäten in dem Bereich begrenzt.

Das wissenschaftliche Ziel und die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit ist demnach die Entwicklung von Methoden zur Generierung ballistischer Bewegungstrajektorien von komplexen mechatronischen Systemen am Beispiel von zweibeinigen, mobilen Robotern. Der besondere Wert dieser Methode soll in der Vereinfachung des Steuerungskonzeptes liegen. Weitere nutzbare Eigenschaft der ballistischen Trajektorien wird in der Optimierung des Energieverbrauchs und in der Minimierung der mechanischen Strukturbelastungen gesehen.

Zum Nachweis der vorgeschlagenen Steuerungsmethoden sowie Regelungsalgorithmen sind auch folgende technische Ziele definiert:

- Entwurf und Implementierung von mechatronischen Konstruktionen und Steuerungssystemen für einen zweibeinigen mobilen Roboter ROTTO sowie einen sechsbeinigen mobilen Roboter ANTON;
- simulative und experimentelle Erprobung der vorgeschlagenen Methode zur Generierung ballistischer Bewegungen an dem entwickelten zweibeinigen, mobilen Roboter ROTTO unter Verwendung von hybriden Simulationstechniken.

Die Arbeit ist folgendermaßen gegliedert. Im Kapitel 1 wird zunächst die Problematik der Entwicklung und Bewegungssteuerung einer Klasse der schreitenden mobilen Roboter erläutert. In der Folge wird die Analyse der bekannten Lösungen und Roboterprototypen auf dem Gebiet mehrbeiniger bzw. zweibeiniger mobiler Roboter vorgestellt. Das Kapitel gibt einen Überblick der existierenden Konzepte zur Steuerung der stabilen Roboterbewegung sowie auch einen Überblick über die bekannten Problemstellungen bei der Entwicklung der Steuerungsalgorithmen für mobile Roboter. Im Kapitel 2 wird das Konzept zur mechatronischen Entwicklung der Konstruktion mobiler Roboter präsentiert. Verschiedene Aspekte der Auslegung und des Entwurfs einzelner wichtiger Komponenten wird für Prototypen sechs- bzw. zweibeiniger Roboter beschrieben. Das Kapitel 3 gibt einen detaillierten Einblick in den Entwurf und Aufbau des Steuerungssystems. Schwerpunkt wird dabei auf Modularität des Systems und auf Anwendung der hybriden Simulationstechniken bei Entwicklung und Inbetriebnahme gelegt. Das Kapitel 4 widmet sich dem Ziel der Generierung der ballistischen Raumbewegungen der zweibeinigen mobilen Roboter. Ausgehend von vereinfachten Modellen wird das Konzept der ballistischen Bewegungssteuerung erklärt und daraufhin auf die komplexeren Mechanismen erweitert. Fragen zur

Gleichgewichtserhaltung der zweibeinigen mobilen Roboter werden anschließend im Kapitel 5 betrachtet. Das Kapitel 6 ist der simulativen und experimentellen Erprobung der theoretischen Ansätze und der vorgestellten Konzepte gewidmet. Dabei werden anhand der erarbeiteten Testsituationen die Lösungen sowohl für Stabilisierungsaufgaben als auch für ballistische Bewegungsaufgaben an einem Prototyp des zweibeinigen mobilen Roboter ROTTO getestet. Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeit erfolgt im Kapitel 7.

Kapitel 2

Entwurf mechatronischer Komponenten für mobile Roboter

In diesem Kapitel wird der systematische Ansatz zur Entwicklung mobiler Roboter beschrieben. Des Weiteren wird auf Einzelheiten der Auslegung der Konstruktion, Auswahl, Dimensionierung und Entwicklung der Antriebskomponenten des an der Universität Magdeburg entwickelten sechsbeinigen Roboter ANTON, sowie des zweibeinigen Roboter ROTTO eingegangen.

2.1 Konzept zur mechatronischen Entwicklung der Konstruktion

Ohne eine breite Einbeziehung von modernen Rechen- und Softwaretools ist heutzutage eine systematische Entwicklung kaum denkbar. Ein iterativer Prozess der Strukturauslegung und Optimierung, Entwurf der hardware- und softwareseitigen Module und Integration einzelner Komponenten erfolgt in mehreren Durchläufen. In Gegensatz zu rein mechanischen oder elektrischen Systemen ist dieser Prozess wegen der unterschiedlichen Schnittstellen, verschiedenen physikalischen Domänen, Komplexität und Integrationsforderungen jedoch wesentlich aufwendiger.

Somit erfordert die Entwicklung mobiler Roboter ein gleichzeitiges Vorgehen in breit angelegten Technikbereichen. Die Entwicklung der Mechanik, Elektronik und Verkabelung, Regelungs- und Steuerungstechnik wurden beim traditionellen Entwurf in „bottom-up-design“ (mit nur gelegentlichen Abstimmungen und oft hintereinander) durchgeführt. Ein „concurrent engineering“ oder „top-down-design“ ermöglicht dagegen eine mehr oder weniger gleichzeitige Entwicklung des Roboters zu einen Gesamtoptimum unter Berücksichtigung von Integrations- und Funktionsforderungen der Mechatronik. Dazu müssen die einzelnen Entwurfsbereiche effizient zusammengefügt werden.

Es existieren eine Vielzahl von Vorgehensmodellen für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Ein aus der Softwareentwicklung bekannte Spiralmodell wurde von Chan und Leung [124] auf mechatronische Produkte angewendet, um somit die Entwurfsiterationen und die frühzeitige Validierung besser unterstützen zu können. Ein Vorgehensmodell für die

Entwicklung integrierter mechanisch-elektronischer Baugruppen wurde im Rahmen des BMBF-Projektes INERELA erarbeitet [125], wobei parallele Entwicklung von Baugruppe und Fertigungsprozess eine wichtige Rolle spielt. Ein aus zwölf Schritten bestehendes Vorgehensmodell ausgerichtet auf die Entwicklung von Mehrkörpersystemen mit kontrolliertem Bewegungsverhalten wurde von Isermann [126] vorgeschlagen. In seinem Vorgehensmodell zur Lösung des Komplexitätsproblems mechatronischer Systeme weist Lückel [127] auf die besondere Rolle der rechnerunterstützten Entwurfsverfahren, die die frühzeitige Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens ermöglichen, sowie der Methoden zur horizontalen und vertikalen Strukturierung, hin.

Die VDI Richtlinie 2206 [119] „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ beschreibt das prinzipielle Vorgehen beim Entwurf mechatronischer Systeme. Ein flexibles Vorgehensmodell, bestehend aus folgenden Elementen, wird angegeben:

1. Problemlösungszyklen als Mikrozyklus:

- Lösungssuche durch Analyse und Synthese für Teilschritte
- Vergleich von Ist- und Sollzustand
- Bewertung, Entscheidung
- Planung

2. Makrozyklus in Form eines V-Modells

- Logische Abfolge von Teilschritten
- Anforderungen
- Systementwurf
- Domänenspezifischer Entwurf
- Systemintegration
- Eigenschaftsabsicherung (Verifikation, Validierung)
- Modellbildung (flankierend)
- Produkte: Laborprototyp, Funktionsprototyp, vorserienreife Roboter

3. Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte

- Wiederkehrende Prozessbausteine
- Systementwurf, Modellbildung, Bauelemente-Entwurf, Integration, ...

Die wichtigsten Entwurfsschritte bei der Entwicklung von mobilen Robotern sind in Abbildung 2.1 in Form eines erweiterten V-Modells dargestellt. Es unterscheidet zwischen Systementwurf bis zu einem Laborprototyp, der Systemintegration bis zum Funktionsprototyp und Systemtests bis zum fertigen, vorserienreifen Roboter.

Beim Durchschreiten der einzelnen Stufen des V-Modells nimmt der Reifegrad des entwickelten Roboters allmählich zu. Die einzelnen Schritte sind jedoch um viele Iterationen zu ergänzen, die in dem V-Diagramm nicht eingezeichnet sind.

Ein Modell des Roboters wurde iterativ in einem mechanischen CAD-Werkzeug Schritt für Schritt erweitert und mit einem Festkörper-Simulationsmodell abgeglichen.

Bei dem V-Modell nach [119] wird nach Systementwurf und Systemintegration mit einem jeweils domänenspezifischen Entwurf in Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik als verbindenden Zwischenschritt unterschieden. Dabei sind in der Regel mehrere Durchläufe erforderlich, um z.B. folgende Zwischenprodukte zu erzeugen:

Laborprototyp: erste Wirkprinzipien und Lösungselemente, Grobdimensionierung, erste Funktionsuntersuchungen

Funktionsprototyp: Weiterentwicklung, Feindimensionierung, Integration verteilter Komponenten, Leistungsmessungen, Standard-Schnittstellen

Vorserienreife Roboter: Berücksichtigung der Fertigungstechnik, Standardisierung, weitere, modulare Integrationsstufen, Kapselung, Feldtests

In der Regel wird bei der Entwicklung eines mobilen Roboters für Forschungszwecke nur der Zustand eines Laborprototyps erreicht, um die gewünschte Theorie bzw. den Ansatz zu prüfen. Dabei bleibt es meistens nur bei dem Systementwurf mit begrenzter Anzahl an Tests und Entwurfzyklen. Auf Systemintegration wird oft verzichtet. Seltener werden die mobilen Roboter bis zum Reifegrad eines Funktionsprototyps entwickelt. Mit dem Funktionsprototyp lassen sich hingegen umfangreiche Untersuchungen und Tests durchführen. Hybride Test- und Simulationstechniken wie „Software-in-the-Loop“ und „Hardware-in-the-Loop“ stehen auf diesem Weg zur Hilfe. Dabei gibt es aufgrund der tieferen Optimierung und Systemintegration viel weniger Ausfälle oder Funktionsstörungen.

Nur wenn eine Erstellung von mehreren Prototypen mit gleichem Funktionsumfang gewünscht ist, werden die Funktionsprototypen weiter aufwendig getestet und optimiert bis ein vorserienreifer Roboter entsteht. Von diesem Reifegrad zu einem in Serie produzierten Roboter sind weitere kostenintensive Zwischenschritte der Standardisierung, Zertifizierung und Qualitätsprüfung erforderlich.

Bei der Entwicklung der mobilen Roboter ANTON und ROTTO in Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde in beiden Fällen der Reifegrad eines Funktionsprototyps erreicht, wobei in einigen Bereichen auch für Vorserienprodukte spezifische Funktions- und Belastungstests durchgeführt wurden. Die Anwendung von hybriden Simulationstechniken wie Hardware-in-the-Loop, Software-in-the-Loop und Rapid Control Prototyping wird detailliert im nächsten Kapitel mit dem Entwurf des Steuerungssystems erläutert.

Beim Entwurf von mechatronischen Systemen ist ein allgemeines Ziel rechnergestützte Werkzeuge aus verschiedenen Bereichen zusammenzuführen. Zum domänenspezifischen Entwurf dienen im Allgemeinen Software-Tools, wie z.B. CAD/CAE für die Mechanik, 3D-Entwurf mit SolidWorks, FEM-Werkzeuge für Belastungsanalyse, Elektronik und Platinen-Layout mit OrCad, Firmware für Mikroelektronik mit C/VHDL/Verilog und Werkzeuge für den Regelungsentwurf. Eine besondere Flexibilität stellt die Verwendung von domänenübergreifenden Werkzeugen wie Modellica/Dymola und das weit verbreitete Simulations- und Dynamik-Entwurfstool Matlab/Simulink zur Verfügung.

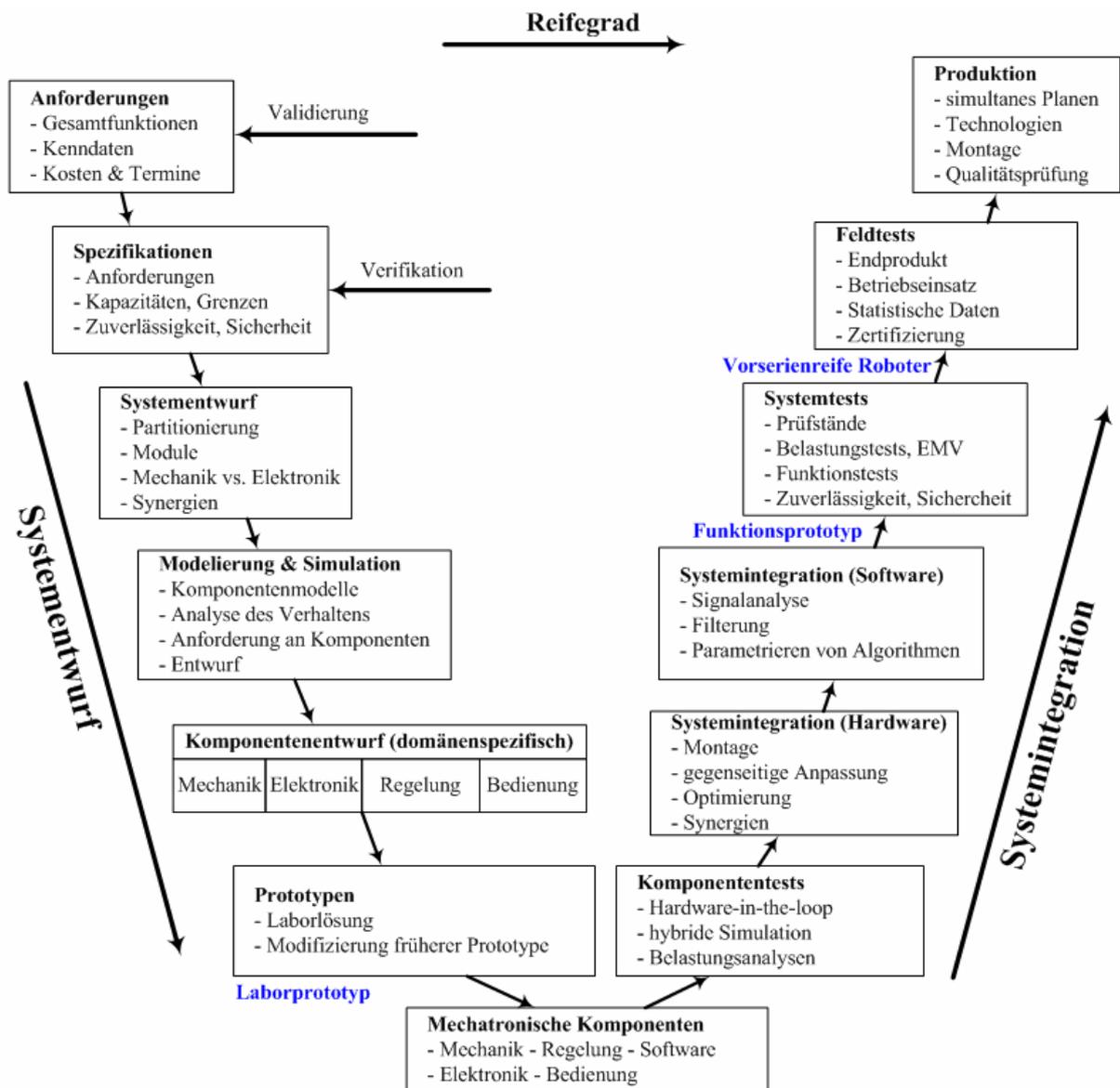


Abb. 2.1 – Entwurfsschritte für mechatronische Systeme als V-Modell

2.1.1 Auswahl der Gelenkstruktur

Da das Verhältnis der Antriebsleistung zum Gewicht bei der Auslegung der mobiler Roboter eine der wichtigsten Rollen spielt, wurde bei der Konstruktion versucht, die Gelenkstruktur so zu gestalten, dass bei Gelenken mit mehr als einem Freiheitsgrad die gewünschte Funktion über das Zusammenspiel mehrerer Antriebe erreicht wird. Somit kann die mehrfache Antriebskraft die gewünschte Bewegung erzielen und Motoren können entsprechend kleiner und leichter ausgewählt werden.

In Abbildung 2.2 ist ein kinematisches Schema des modularen mobilen Roboters ANTON dargestellt.

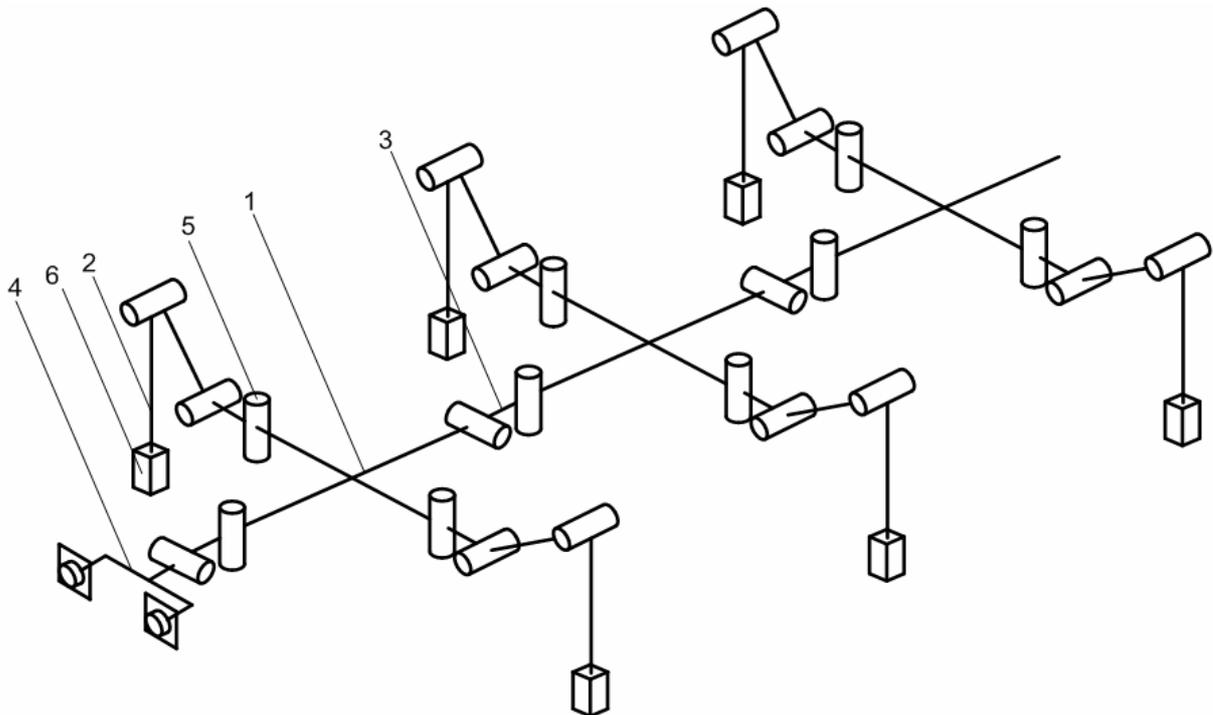


Abbildung 2.2 - Kinematisches Schema des mobilen Roboters ANTON

Der Roboter hat eine modulare Struktur und besteht aus den drei Segmenten. Jedes Segment hat einen Körper (1), zwei Beine (2) und ein Kopplungsgelenk (3). Durch diese Unterteilung wird auch die Erweiterbarkeit des Roboters um zusätzliche Segmente ermöglicht.

Jedes Bein besitzt drei Freiheitsgrade, die wiederum mittels dreier Antriebe bewegt werden. Das Kopplungsgelenk zwischen zwei benachbarten Körpersegmenten hat zwei Freiheitsgrade und ist mechanisch dem 2-DOF Schultergelenk ähnlich. Auch das Gelenk zur Positionierung des Kamerakopfs (4) ist ähnlich dem 2-DOF Aufbau. Da jedes Segment bis zu 8 Gelenke (5) besitzt, hat der Roboter mit drei Segmenten insgesamt 24 Gelenke. Die Füße des Roboters sind zusätzlich mit Kraftsensoren (6) ausgerüstet.

In Abbildung 2.3 ist das kinematische Schema des zweibeinigen Roboters ROTTO dargestellt. Von der Gelenkstruktur dieses Roboters wurde eine hohe Modularität gefordert, um eine spätere Erweiterung der Konstruktion bzw. Änderung der Antriebsleistung zu ermöglichen.

Funktionell weist der Roboter eine klassische humanoide Struktur auf, wobei jedes Bein mit sechs Freiheitsgraden ausgestattet ist. Die Abduktion/Adduktion bzw. Flexion/Extension des Fußes wird mit Hilfe von zwei Freiheitsgraden erzielt. Ein Kniegelenk hat einen eigenen Freiheitsgrad; ein Hüftgelenk hat jeweils drei Freiheitsgrade. Außerdem wird der Roboterkörper mit Hilfe von drei Freiheitsgraden in Bezug auf das Becken bewegt. Bei der Auslegung der Struktur wurde besonders auf die Anordnung der Freiheitsgrade geachtet, so dass die einzelnen Achsen sich in Gelenken mit mehreren Freiheitsgraden in einem Punkt schneiden. Diese Eigenschaft hat eine Vereinfachung der Beschreibung der Kinematik des Systems zur Folge und verkürzt somit auch die Rechenzeit der Simulation für die entsprechenden Steuerungsalgorithmen.

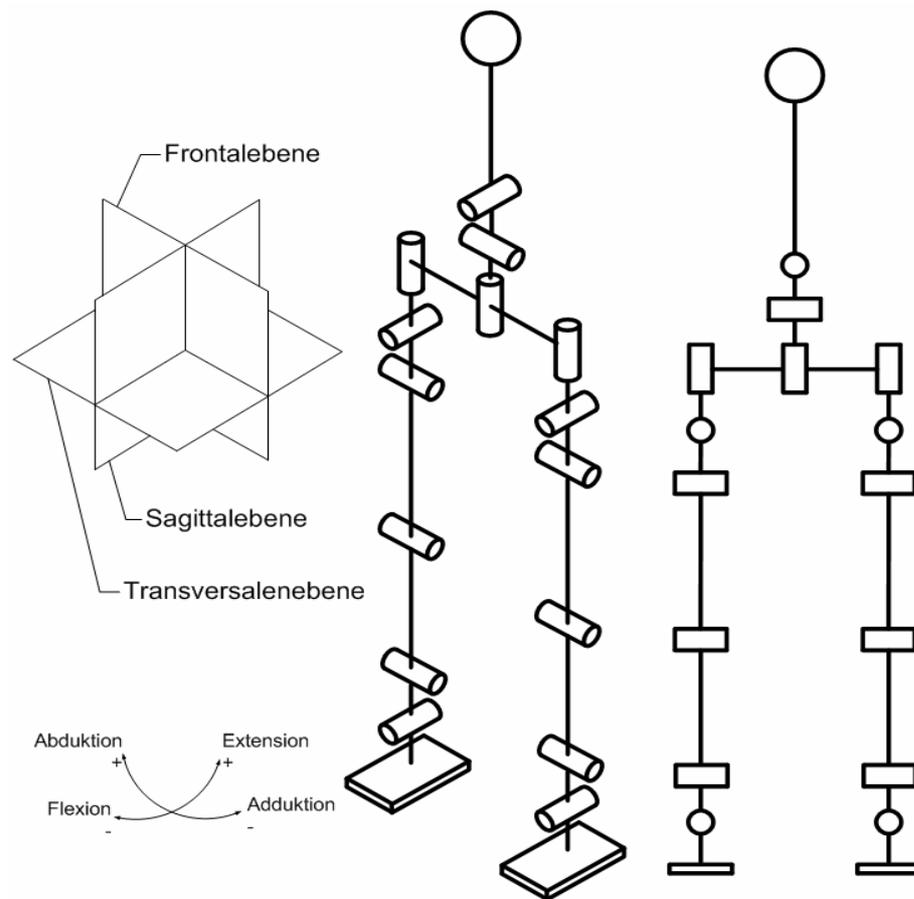


Abbildung 2.3 - Kinematisches Schema des mobilen Roboters ROTTO

2.1.2 Auslegung der Roboterparameter

Bei der Auslegung sechsbeiniger mobiler Roboter dienen statischen Belastungen wie Eigengewicht und deren Verteilung sowie die Tragfähigkeit der Maschine als Ausgangswerte. Da sechsbeinige Laufmaschinen größtenteils im statisch stabilen Bereich betrieben werden, ist diese Annahme zulässig. Außerdem wurde bei der Entwicklung des sechsbeinigen mobilen Roboters ANTON auf die Erfahrung mit vorigen Prototypen (s. Kapitel 2.2) zurückgegriffen. Trotzdem wurde die Entwicklung des Roboters nach dem oben beschriebenen Konzept in mehreren Schritten durchgeführt. Mit Hilfe dynamischer Mehrkörpersimulation im Vortex-Simulator [123] gekoppelt an ein Steuerungs- und Regelungssystem im Matlab/Simulink wurden die notwendigen Gelenkdrehmomente bzw. Gelenkwinkelgeschwindigkeiten sowie der Arbeitsraum präzisiert [112, 114]. Tabelle 2.1 fasst die wichtigsten Auslegungsparameter zusammen.

Für die Auslegung des zweibeinigen Roboters sind die statischen Belastungswerte nicht ausreichend. Hier wurde zunächst mit der Analyse der Dynamik des menschlichen Ganges begonnen. In weiteren Entwicklungsschritten wurden die mechanischen Modelle und Modelle für die dynamische Simulation erweitert und abgeglichen. In dynamischen Simulationen wurden die Gangmuster für die Gehgeschwindigkeit im Bereich 1 bis 2,5 km/h untersucht, um die Verläufe für Gelenkdrehmomente, Gelenkgeschwindigkeiten und Beschleunigungen sowie die Reaktionskräfte des Untergrundes zu erhalten. Das Simulationssystem wurde um

die Modellierung des Kontaktes sowie der Dynamik der Antriebe erweitert, um möglichst exakte Simulationsergebnisse zu erhalten [112, 121, 122]. Entsprechend der Anforderungen an die Betriebszustände wie Stehen, Gehen und Kniebeugen wurden die auftretenden Belastungen, Geschwindigkeiten und erforderlichen Arbeitsräume in mehreren Simulationen auf Plausibilität überprüft. Tabelle 2.2 fasst die wichtigsten Auslegungsparameter zusammen.

Tabelle 2.1. Auslegungsparameter aus Simulationsergebnissen des mobilen Roboters ANTON

	Schultergelenk		Kniegelenk	Körpergelenk	
	Abd./Add.	Flex./Ext.	Flex./Ext.	Abd./Add.	Flex./Ext.
Max. Drehmoment [Nm]	2	5,2	0,8	2,7	4,6
Max. Geschwindigkeit [rad/s]	3,2	2,7	1,9	0,9	0,9
Mittl. mech. Leistung [W]	4	7	1,5	2,5	2

Tabelle 2.2. Auslegungsparameter aus Simulationsergebnissen des mobilen Roboters ROTTO

	Hüftgelenk		Kniegelenk	Fußgelenk	
	Abd./Add.	Flex./Ext.	Flex./Ext.	Abd./Add.	Flex./Ext.
Max. Drehmoment [Nm]	4	27	16	7	23
Max. Geschwindigkeit [rad/s]	2,4	4,7	9	2,3	5,3
Mittl. mech. Leistung [W]	7	22	27	9	25

	Hüftgelenk	Körpergelenk		
	In./Aus.Rot.	In./Aus.Rot.	Abd./Add.	Flex./Ext.
Max. Drehmoment [Nm]	3	2,5	3	5
Max. Geschwindigkeit [rad/s]	1,6	1,6	2,7	3
Mittl. mech. Leistung [W]	3,5	2,3	4	8

2.1.3 Analyse und Realisierung der Antriebstechnik

Die Dynamik des lokomotorischen Apparates von Säugetieren (auch Menschen) wird durch besondere Aktoren – Muskel – gewährleistet. Die Besonderheit solcher chemomechanischen Aktoren liegt nicht nur in der Erzeugung mechanischer Energie durch einen chemischen Prozess, sondern auch in dem strukturellen Aufbau der Muskel.

Der Muskel, aus funktioneller Sicht, stellt eine große Anzahl parallel aber nicht synchron wirkenden Aktoren mit verschiedenen mechanischen Eigenschaften dar. Des Weiteren stellt der Muskel einen Aktor mit einer seriell geschalteten Elastizität und stark nichtlinearen Eigenschaften dar. Während der Bewegung wirken die Muskeln nicht die ganze Zeit. Sie werden lediglich bei Beschleunigungs- bzw. Bremsvorgängen aktiviert. Die Wirkung der Muskel wird durch Impulse unterschiedlicher Dauer realisiert. Diese Impulse sind aber wesentlich kürzer als der Bewegungszyklus selbst.

Es existiert ein gewisses, energieoptimiertes Bewegungstempo (für einen Menschen ist es etwa 3,5 km/h). Dieses wird erreicht, wenn die Bewegungen der Extremitäten während der Translationsphase in Form von freien ballistischen Schwingungen erfolgen. Eine Änderung der Bewegungsgeschwindigkeit braucht wiederum mehr Energie. Nichtsdestotrotz, die nichtlineare Eigenschaften des lokomotorischen Apparates und die Möglichkeit der Regelung der Steifigkeit der Aktoren erlaubt auch eine erhebliche Steigerung der Bewegungsgeschwindigkeit ohne drastische Energieverluste. Diese Eigenschaft wird auch in vielen wissenschaftlichen Arbeiten intensiv untersucht [25, 48, 63]. Die Versuche, einen Aktor mit muskelähnlichen Eigenschaften zu entwickeln, sind bisher leider erfolglos geblieben. Dennoch konzentrieren sich die Entwickler auf ausgeklügelte Regelungsstrategien für konventionelle elektrische, pneumatische und hydraulische Antriebe, um die wichtigsten mechanischen Eigenschaften des biologischen Muskels, wie geregelte Steifigkeit und Dämpfung, regelungstechnisch erreichen [25, 63].

Die Analyse existierender Prototypen zweibeiniger Roboter zeigt, dass die Kombination aus einem Gleichstrommotor und eines Harmonic Drive Getriebes häufig auch über eine Zahnriemenstufe gekoppelt, eine weit verbreitete Variante ist [53, 59, 60]. Seltener werden statt bürstenbehafteten Gleichstrommotoren bürstenlose Gleichstrommotoren oder Kombination aus beiden verwendet.

Einige Prototypen zweibeiniger Roboter, wie JOHNNIE von der Technischen Universität München [52, 53], werden neben klassischen Variante Harmonic Drive/Gleichstrommotor über ein Kugelgewindetrieb in den Fußgelenke bewegt [53-56]. Eine exotischere Variante, die Planetenrollentriebe, findet im zweibeinigen Roboter BIP2000 [120] Verwendung. Aber auch klassische Planeten- oder Stirnradgetriebe werden beim Prototypenbau wegen hoher Verfügbarkeit und relativ niedrigen Kosten oft in Betracht gezogen.

Bei der Auswahl eines Motors für einen mobilen Roboter ist das Verhältnis der Leistung zum Eigengewicht des Motors ein primärer Parameter. Um die Auswahl einzugrenzen, wurden die am Markt verfügbaren Motoren in Bezug auf ihr Leistungsgewicht analysiert. Abbildung 2.4 zeigt einen relativen Vergleich mehreren Motoren und Motortypen.

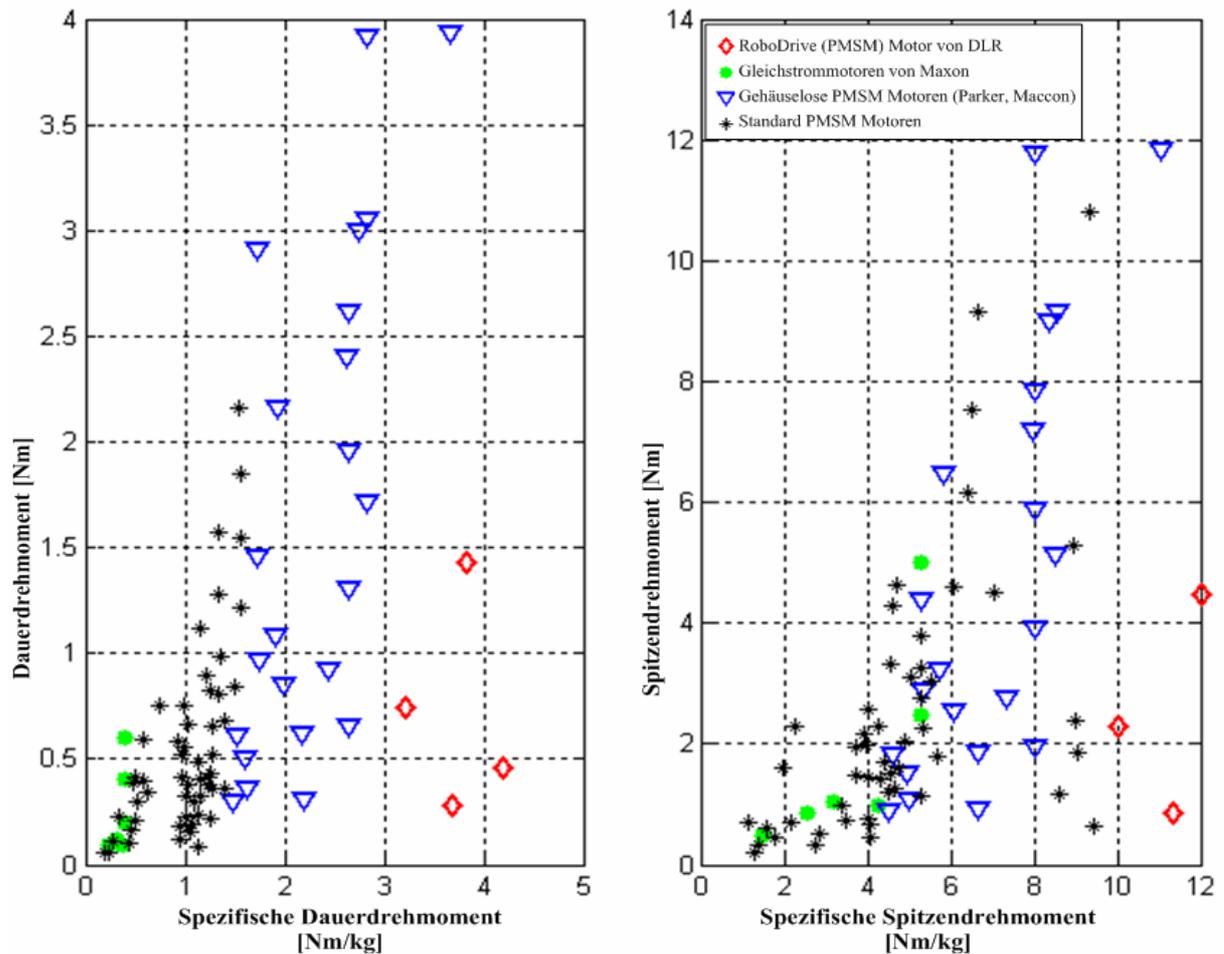


Abb. 2.4 - Vergleich der Leistungsdichte mehreren Motoren und Motortypen

Offensichtlich sind Permanentmagnet erregte Synchronmotoren (PMSM) Gleichstrommotoren bezüglich verfügbarem Spitzen- bzw. Dauerdrehmoment überlegen. Auch können PMSM Motoren größere Haltedrehmomente viel länger liefern als Gleichstrommotoren, deren Drehmoment stark durch die bürstenbehaftete Kommutierung begrenzt ist. Diese Eigenschaft ist insbesondere bei relativ langsamen Bewegungen des Roboters oder im Stillstand bzw. Balancieren wichtig, wobei die Motoren mit der Geschwindigkeit nahe Null und im Umkehrbetrieb betrieben werden. Jedoch besitzen PMSM Motoren den Nachteil, dass durch den 3-phasigen Aufbau die nötige Leistungselektronik bzw. Regelungsalgorithmus wesentlich komplexer ausfällt als bei vergleichbaren Gleichstrommotoren.

Als Anforderungen an die Antriebe des sechsbeinigen Roboters ANTON wurden hohe Dynamik, kleine Abmessungen und geringes Gewicht sowie die Möglichkeit der einfachen und präzisen Regelung gestellt. Entsprechend der Auslegung wurden die DC-Kleinstmotoren von Faulhaber [117] Serie 1724 (3W) und 2232 (9W) ausgewählt. Diese Motoren mit eisenloser Wicklung sind sehr dynamisch und weisen einen eingebauten magnetischen Impulsgeber mit 512 Impulsen pro Umdrehung auf. Ein Stirnradgetriebe übersetzt die hohe Drehgeschwindigkeit des Motors in eine niedrige Geschwindigkeit mit hohem Drehmoment. Die Integration der Antriebe in die Roboterkonstruktion wird unten detailliert beschrieben.

Als Anforderungen an die Antriebe des zweibeinigen Roboters ROTTO wurden neben hoher Dynamik und geringem Gewicht die Modularität der Antriebe sowie große Drehmoment-

kapazität genannt. Hervorgerufen durch die Gesamtkomplexität des Roboters sollten die Antriebe bei einem einfachen Aufbau dennoch die komplette Integration aller Antriebskomponenten wie Motor, Sensor, Getriebe und Elektronik in einem mechatronischen Antriebsmodul ermöglichen.

Die gestellten Anforderungen haben einen relativ dauerhaften Entwicklungsprozess hervorgerufen. In Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden anhand zahlreicher CAD-Entwürfe, Simulationen und Tests mehrere Antriebskonzepte entwickelt und geprüft. Einige davon, wie ein Rolling Rotor Motor [115] oder ein modifiziertes Leichtbau-Zykloiden-Getriebe, haben vielversprechende Ergebnisse gezeigt, und werden momentan in eigenständigen Projekten weiterentwickelt. Es wurden aber auch exotischere Varianten wie „Twisted-Wire“ Antriebe [116] entwickelt und untersucht, die womöglich in hocheffizienten Roboterhänden oder sogar Prothesen ihre Anwendung finden können.

Unter Anderem wurde auch eine spezielle Bauart von PMSM Motoren – „frameless motor“ – untersucht, die lediglich aus einem laminierten Ständer mit einer 3-phasen Wicklung und einer mit Seltenerdmetallen bestückten Rotorhülse bestehen. Dieser Bauart macht eine optimale Integration des Motors in die Antriebskonstruktion möglich.

Wie bereits aus der Analyse der Motortypen ersichtlich (s. Abb. 2.4), kann die von der DLR entwickelte RoboDrive Motorreihe [118] als effizienteste in Bezug auf das Leistungsgewicht ausgewählt werden. Diese technisch raffinierten, bürstenlosen Motoren sind für die wichtigsten Anforderungen der Robotersysteme, wie hohe Drehmomentkapazität und geringe Verlustleistung, optimiert. Die RoboDrive Motoren wurden ebenfalls in Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht und getestet. In Abbildung 2.5 sind die Varianten der Integration des RoboDrive Motors in einem kugelgewindetrieb-basierten Linearantrieb sowie einem Rotationsantrieb mit einem Leichtbau- Zykloidengetriebe für zweibeinigen Roboter ROTTO dargestellt.



Abb. 2.5 – Kompakte RoboDrive- basierte Antriebe für zweibeinigen Roboter ROTTO

Durch die optimale Integration des gehäuselosen Motors in die Antriebskonstruktion kann auf eine Motorkupplung bzw. Zahnriemenstufe verzichtet werden. Neben der vereinfachten Konstruktion und erhöhten Zuverlässigkeit ist ein solcher Antrieb spielfrei und verfügt über eine sehr hohe Steifigkeit und Bandbreite. Die Ergebnisse der aufgeführten Untersuchungen können allerdings hier lediglich in einem begrenzten Umfang dargestellt werden.

Trotz vielversprechender Tests mit dem RoboDrive Motor, wurde das Antriebskonzept für den zweibeinigen Roboter ROTTO aufgrund weiterer Kostenoptimierung angepasst.

In diesem modifizierten Konzept treibt ein leistungsfähiger, bürstenloser Motor von Maxon [MAXON] mittels einer Zahnriemenstufe einen Kugelgewindetrieb an. Die lineare Bewegung der Kugelmutter wird mit Hilfe von steifen Kohlefaserstäben, die gleichzeitig als Führungen benutzt werden, abgeführt. Die Rotorposition wird mittels eines Inkrementalgebers mit einer Auflösung von 8192 Schritten pro Umdrehung erfasst. Zwei magnetische Endschalter sind zur Überwachung des Arbeitsbereichs in die Konstruktion integriert. Ein integriertes Elektronikmodul übernimmt die Regelung bzw. Überwachung des Antriebs. Abbildung 2.6 zeigt den Gesamtaufbau und Tabelle 2.3 die technischen Daten des entwickelten Linearantriebs.

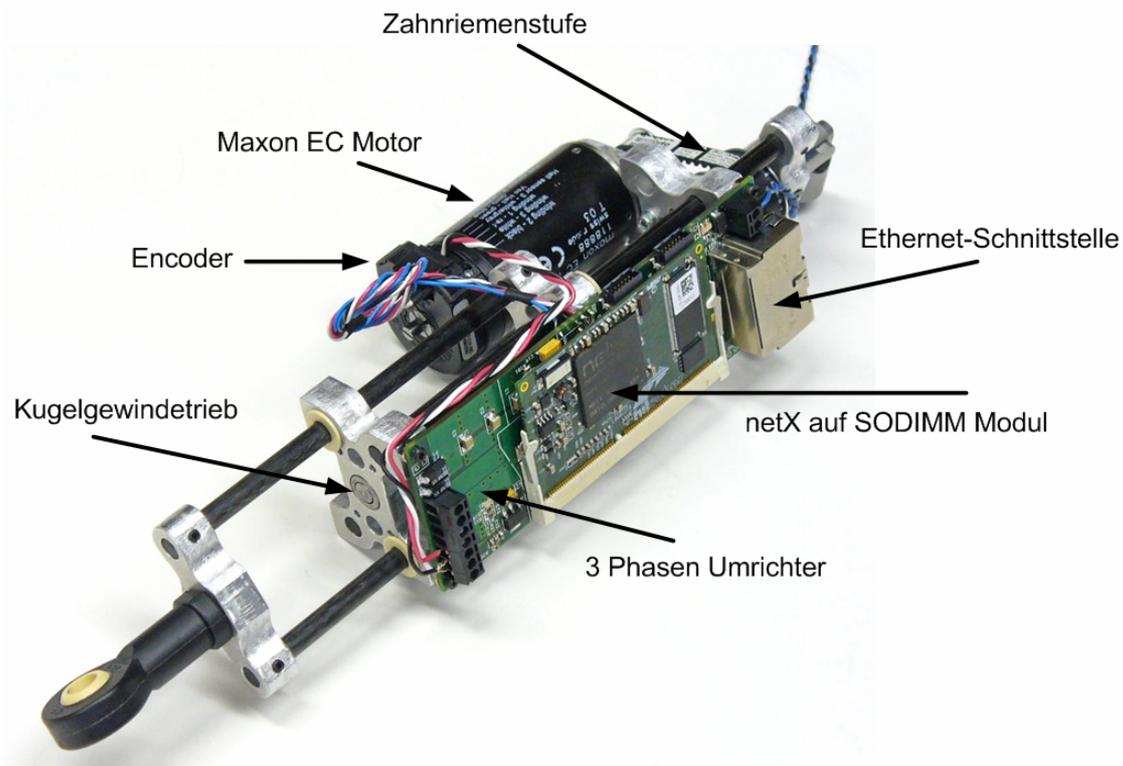


Abb. 2.6 – Integrierter Linearantrieb für zweibeinigen Roboter ROTTO

Tabelle 2.3. Technische Daten des Antriebsmoduls für zweibeinigen Roboter ROTTO

	Nenn	Max*
Kraft [N]	128	1060
Geschwindigkeit [m/s]	0,64	0,72
Mech. Leistung [W]	80	290
Gewicht [g]	-	650

* - maximale Werte können nicht gleichzeitig erreicht werden.

Die komplette Integration des Motors, des Getriebes, der Sensoren und der elektronischen Steuerung in einem mechatronischen Modul bietet folgende Vorteile:

- geringes Bauvolumen des Antriebsmoduls,
- bessere dynamische Eigenschaften,
- hohe Leistungsdichte und bessere Effizienz,
- hohe Zuverlässigkeit durch bürstenlose Motoren und modulare Bauweise sowie
- integrierte Überwachungs- und Diagnosefunktionen.

Der Verzicht auf ein Stirnradgetriebe zugunsten einer Zahnriemenstufe hat einen kompakteren Aufbau mit besserem Wirkungsgrad bewirkt und außerdem zur geringeren Geräuschentwicklung beigetragen. Des Weiteren sind die komplette Module sowie die entsprechenden Einzelteile untereinander austauschbar. Das ermöglicht eine einfachere Reparatur und Instandhaltung des Roboters. Sofern nötig, ist eine weitere Anpassung der Antriebskraft des entwickelten Linearmoduls durch einfaches Ersetzen des ausgewählten Motors möglich.

Durch die Integration von DMS Sensoren an der Befestigungsbrücke des Linearantriebs ist eine nachträgliche Erweiterbarkeit jedes Moduls um zusätzliche Kraft-/Impedanzregelung vorgesehen.

Die Funktionsweise und Inbetriebnahme der entwickelten Linearantriebe wird im nachfolgenden Kapitel detailliert beschrieben.

2.2 Konstruktive Umsetzung des sechsbeinigen mobilen Roboters ANTON

Die Entwicklung von sechsbeinigen mobilen Robotern an der Universität Magdeburg hat eine langjährige Geschichte. Die erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb- und Automatisierung führte zur Entstehung einer Reihe von Forschungsprototypen. Angefangen in den neunziger Jahre mit dem Bau des sechsbeinigen Schreitroboters KATHARINA wurde ein Meilenstein in der Erforschung von Verfahren und Algorithmen [108 - 110] zur Kraftsensibilität der Beine, zur Vergrößerung der Relief- und Bodenangepasstbarkeit mit Hilfe multisensorischer Signale und der Nutzung des Körpers als adaptive Plattform für Handhabungs- und Manipulationsoperationen mit montierten technologischen Ausrüstungen gesetzt.

In Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden seit 2002 weitere Prototypen von sechsbeinigen Schreitrobotern gebaut. Die Roboter SLAIR1 und SLAIR2 stellen die Vorgänger-Generationen des mobilen Roboters ANTON dar. Diese Prototypen dienten der Erarbeitung und Perfektionierung des Konzeptes zum mechatronischen Entwurf [112 - 114] sowie zur Überprüfung verschiedener Steuerungssysteme und Ansätze [111].

Die während der Entwicklung von mobilen Schreitrobotern gesammelten Erfahrungen (siehe Abbildung 2.7) wurden bei der Entwicklung des sechsbeinigen mobilen Roboters ANTON umgesetzt. Der als Forschungsplattform konzipierter mobile Roboter soll für Untersuchungen an folgenden wissenschaftlichen und technischen Fragestellungen eingesetzt werden:

- Untersuchung und Weiterentwicklung von Methoden zur Kraft-/Impedanzregelung von Robotern mit überlagerten mechanischen Kopplungen zur Regelung der Kraftwechselwirkungen des gekoppelten Systems;

- Entwicklung theoretischer Grundlagen zur Realisierung eines adaptiven Schreitverhaltens unter Verwendung von Informationen multisensorieller Systeme; dabei sind insbesondere die Informationen von Kraft- und Lagesensoren, Entfernungssensoren sowie Bildverarbeitungssysteme zur Generierung der Schrittbewegung von Bedeutung;
- Entwicklung und Erprobung von Algorithmen zur Multisensorsignalverarbeitung am Prototyp mit dem Ziel des Nachweises der Manövrierfähigkeit des Gesamtsystems in einer Umgebung mit unbekanntem geometrischen und mechanischen Eigenschaften;
- Entwicklung von Grundlagen, der Steuerungstheorie und Regelungsalgorithmen für verschiedene Serviceoperationen, der Roboterbewegung und der Bewegung mitgeführter Werkzeuge.

Der konstruktiven Umsetzung des mobilen Roboters ANTON sind die nachfolgenden Unterkapitel gewidmet.



Abb. 2.7 - Mobile Schreitroboter KATHARINA, SLAIR1 und SLAIR2

2.2.1 Gesamtaufbau

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 dargestellt, ist ein modularer Aufbau dem Roboter ANTON zugrunde gelegt. Bestehend aus drei identischen Körpersegmenten verfügt der Roboter über insgesamt 24 Freiheitsgrade. Die Besonderheit der Konstruktion stellen unter anderem die zusätzlichen Freiheitsgrade zwischen den einzelnen Körpersegmenten dar. Diese sollen dem Roboter u. A. ausreichende Flexibilität bei Durchführung von Kletteraufgaben verleihen. Die Höhe der überwindbaren Hindernisse existierender mehrbeiniger mobiler Roboter ist im Allgemeinen durch die Beinkinematik und auf die maximal erreichbare Beinlänge begrenzt. Durch zusätzliche Flexibilität zwischen Körpersegmenten ist der mobile Roboter ANTON in der Lage, wesentlich größere Hindernisse zu überwinden, als es die maximale Beinlänge erlauben würde.

Eine weitere Besonderheit stellen die speziell entwickelten Gelenke mit zwei Freiheitsgraden dar. Diese werden weiter unten detailliert beschrieben.

Außerdem sind sämtliche antriebs- und steuerungstechnische sowie sensorische Komponenten in Leichtbauweise ausgeführt.

Abbildung 2.8 stellt den CAD - Entwurf des prinzipiellen Gesamtaufbaus des sechsbeinigen mobilen Roboters ANTON dar.

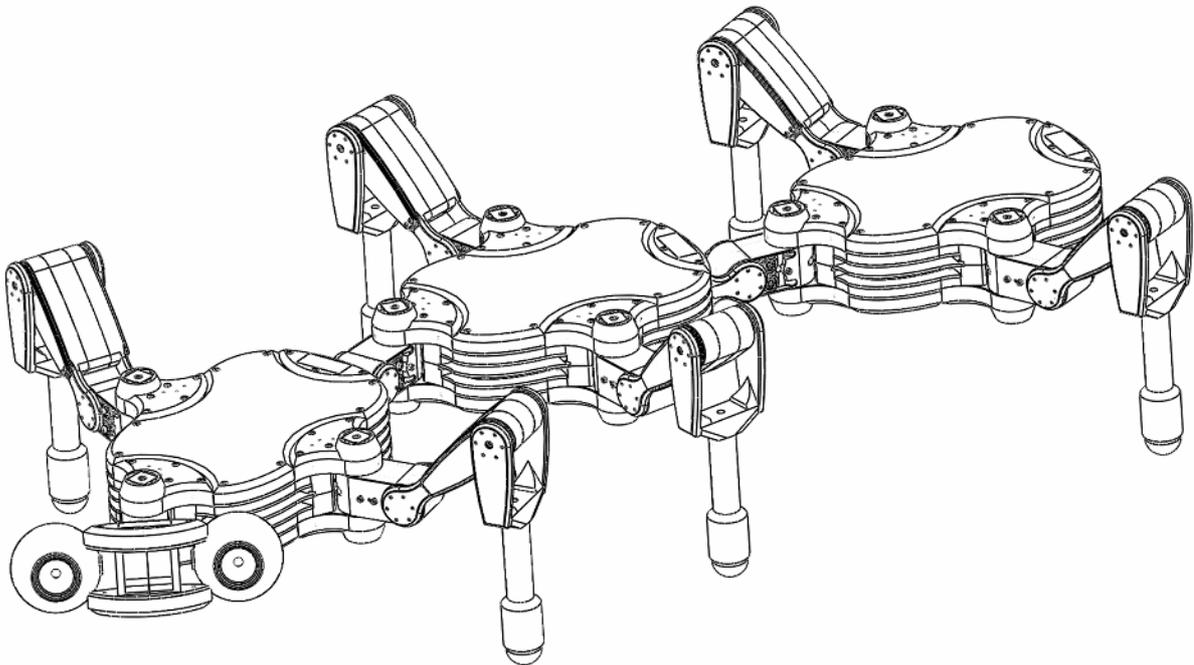


Abb.2.8 – CAD – Entwurf des sechsbeinigen mobilen Schreitroboters ANTON

Die wichtigsten mechanischen Parameter des Roboters sind in der Tabelle 2.4 zusammengefasst.

Tabelle 2.4 - Mechanische Parameter des mobilen Roboters ANTON

Beine	Gesamt: $l_{LEG} = 280$ mm
	Oberschenkel: $l_1 = 100$ mm
	Unterschenkel: $l_2 = 180$ mm
Körper	Gesamtlänge: $l_B = 944$ mm
	Segmentlänge: $l_{BS} = 288$ mm
Gesamtmasse	$m_{ROBOT} = 7$ kg
Max. Geschwindigkeit	$V_{ROBOT} = 1,5$ km/h
Max. Leistungsaufnahme	P _{MAX} = 90 W

Um eine stabile Funktion und Fortbewegung sicher zu stellen, verfügt der Roboter über eine Vielzahl von Sensoren. Jeder der 24 Motoren ist mit einem Inkrementalgeber ausgestattet, der die Erfassung und Regelung der Motorgeschwindigkeit ermöglicht. Die Position jedes Gelenks wird an der Ausgangswelle des Getriebes durch einen Servopotentiometer erfasst. Ein speziell entwickelter 3-komponenten Kraftsensor ist zur Messung der Reaktionskräfte in jeden Roboterfuß integriert. Aufbau und Funktion des Kraftsensors werden in weiteren Unterkapiteln detailliert beschrieben. Zur Erfassung der Raumlage des Roboters relativ zur

Oberfläche sowie zur Orientierung im Raum und Erkennung von Hindernissen dienen Neigungssensoren und ein Stereokamerakopf.

Abbildung 2.9 zeigt den sechsbeinigen mobilen Roboter ANTON während einer Vorführung auf einem Messestand.



Abb.2.9 - Mobiler Schreitroboter ANTON auf einem Messestand

2.2.2 Kniegelenk

Das Kniegelenk des Roboters wird mit Hilfe eines elektrischen Antriebes bewegt. Das Antriebssystem ist komplett in die Oberschenkelkonstruktion integriert und besteht aus einem Gleichstrommotor mit integriertem Inkrementalgeber sowie einem Stirnradgetriebe mit Gesamtübersetzung von 341:1. Für die Erfassung der Winkelposition wird an die Ausgangswelle der Getriebe ein Servopotentiometer angebracht. Außerdem hat die Konstruktion eine zusätzliche elektronische Baugruppe zur Erfassung und Digitalisierung von naheliegenden Signalen, wie des im Unterschenkel integrierten Kraftsensors. Abbildung 2.10 zeigt die Realisierung und den internen Aufbau des Antriebssystems im Kniegelenk.

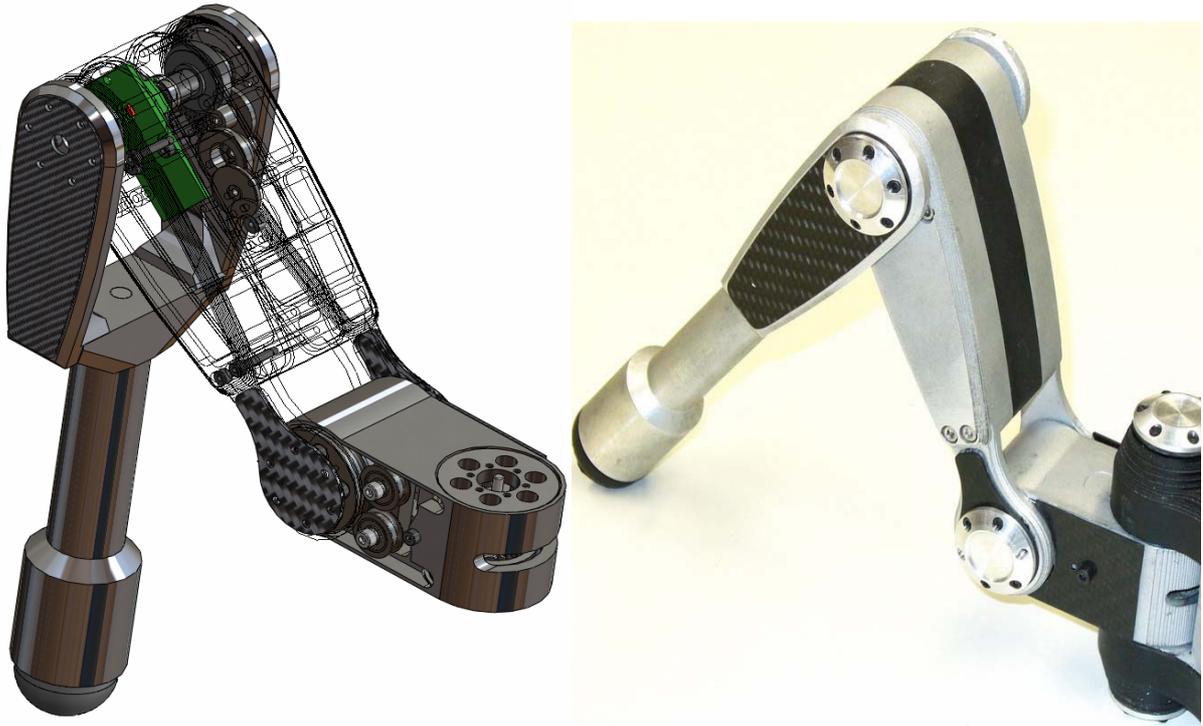


Abb. 2.10 – Aufbau der Antriebseinheit im Kniegelenk des mobilen Roboters ANTON

2.2.3 Schultergelenk

Vom Schultergelenk wird die gesamte Last des Roboters unterstützt bzw. getragen. Daher wurde bei der Auslegung der Konstruktion besonderer Wert auf die optimale Ausnutzung des verfügbaren Antriebsdrehmoments gelegt. Das Schultergelenk verfügt über zwei Freiheitsgrade, die jeweils eine Rotation um die vertikale und die horizontale Achse ermöglichen. Um den Arbeitsbereich zu vergrößern, wurden diese Achsen versetzt zueinander angeordnet. Des Weiteren sind diese Achsen miteinander mit Hilfe eines Differenzials verbunden. Diese Konstruktion des Schultergelenks ermöglicht eine effiziente Ausnutzung des Drehmoments beider Antriebseinheiten.

Abbildung 2.11 stellt den prinzipiellen Aufbau und die Funktionsweise des entwickelten Schultergelenkmoduls dar. Zwei vertikal angeordnete Gleichstrommotoren setzen jeweils über ein Stirnradgetriebe die obere und untere Radnabe des Differenzials in Bewegung. Synchron in eine Richtung angetriebene Radnaben des Differenzials bilden eine vertikale Rotationsachse des Gelenks. Die Rotation des Gelenks um eine horizontale Achse erfolgt über eine spielfreie Seilzugverbindung mit beiden Radnaben, wenn diese in gegenseitige Richtung bewegt werden. Das Gelenk verfügt außerdem über ein integriertes Seilumlenkungs- und Spannsystem sowie eine interne Kabelführung.



Abb. 2.11 – Aufbau des Schultergelenkmoduls des mobilen Roboters ANTON

2.3 Konstruktive Umsetzung des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO

Die während der Entwicklung von sechsbeinigen mobilen Schreitrobotern gesammelten Erfahrungen hatten entscheidenden Einfluss auf den Entwicklungsprozess des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO. Die konstruktive Umsetzung des zweibeinigen Roboters ROTTO unterscheidet sich daher durch eine vereinfachte und robustere Bauweise sowie gesteigerte Modularität verglichen mit der Umsetzung des mobilen Roboters ANTON.

Als Forschungsplattform konzipiert soll der mobile Roboter für Untersuchungen an folgenden wissenschaftlichen und technischen Fragestellungen eingesetzt werden:

- Entwicklung theoretischer Grundlagen zur Realisierung eines energetisch effizienten Ganges; dabei sind insbesondere die Methoden der ballistischen Steuerung sowie effizienten Gangstabilisierung von Bedeutung;
- Untersuchung und Weiterentwicklung von Methoden zur Kraft-/Impedanzregelung des Roboters bei der Kontaktnahme und Regelung der Kraftwechselwirkungen des gekoppelten Systems;
- Entwicklung und Erprobung von Algorithmen zur Multisensorsignalverarbeitung am Prototyp mit dem Ziel des Nachweises eines stabilen Verhaltens des Gesamtsystems in einer Umgebung mit unbekanntem geometrischen und mechanischen Eigenschaften;
- Entwicklung von Grundlagen, der Steuerungstheorie und Regelungsalgorithmen für Durchführung von verschiedenen Montage- und Serviceoperationen, der Roboterbewegung und der Bewegung mitgeführter Werkzeuge.

Die konstruktive Umsetzung des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO wird in nachfolgenden Unterkapiteln detailliert beschrieben.

2.3.1 Gesamtaufbau

Der kinematische Aufbau des zweibeinigen Roboters ROTTO wurde bereit im Kapitel 2.1.1 dargestellt. Bei der Wahl der Rotationsachsen wurden nur die für eine menschenähnliche Bewegung unbedingt notwendige Gelenke berücksichtigt. Der Roboter verfügt somit über insgesamt 15 Freiheitsgrade. Die Besonderheit der Konstruktion stellen modulare Linearantriebe dar. Aufbau und Anordnung dieser Antriebe wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit durch zahlreiche CAD-Modelle und Simulationen untersucht und optimiert.

Die tragende Skelettstruktur ist als Leichtbau-Konstruktion ausgeführt. Diese besteht aus einem steifen und leichten Kohlefaserrohr und mehreren gewichtsoptimierten, aus Aluminium gefrästen Befestigungselementen. Das Kohlefaserrohr dient außerdem als eine einfache Führung der gesamten Verkabelung. Wegen der Verwendung modernster Kommunikations- und Rechentechnik konnte der Aufwand der Verkabelung deutlich reduziert werden. Jede Antriebseinheit ist lediglich über ein CAT-5 Kabel an ein echtzeitfähiges Bussystem angeschlossen und wird über ein weiteres Kabel mit Strom versorgt. Dadurch werden alle Antriebseinheiten, trotz räumlicher Aufteilung, durch die anthropomorphe Struktur des Roboters in einer Linientopologie aufgebaut. Weitere Details über den Aufbau des Steuerungssystems sind im nachfolgenden Kapitel dargelegt.

Besonderes Augenmerk bei der konstruktiven Umsetzung wurde auf die möglichst effiziente Ausnutzung der Antriebskraft gelegt. Ein gutes Verhältnis von Leistung zu Gewicht ist eine der wichtigsten Anforderungen an einen für das dynamische Gehen ausgelegten zweibeinigen Roboter. Deswegen wurde mit Hilfe zahlreicher Simulationen eine optimale Anordnung der Antriebe in einer parallelkinematischen Struktur entwickelt. Diese Anordnung erlaubt die effiziente Ausnutzung der Antriebskraft der beiden Antriebe für jede Bewegung des Gelenks bei einem optimalen Arbeitsbereich. Des Weiterem wird durch die Verwendung von paralleler Kinematik eine höhere Steifigkeit der Konstruktion bei einem geringeren Gewicht erreicht. Abbildung 2.12 stellt den prinzipiellen Gesamtaufbau des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO als CAD - Entwurf und aktuelle Realisierung dar. Zur weiteren Steigerung der Effizienz wurde die beschriebene parallelkinematische Gelenkstruktur an mehreren Stellen der Konstruktion verwendet. Durch zahlreiche Iterationen, in denen die Anzahl der Teile, der Kraftfluss, sowie das Gewicht jeder Einheit optimiert wurden, wurde ein geringes Gewicht des Roboters bei ausreichender Robustheit und Steifigkeit erzielt.

Die Entwicklung und Umsetzung der Oberkörper, Kopf und Arme liegt außerhalb der vorliegenden Arbeit und ist für weiterführende Arbeiten vorgesehen.

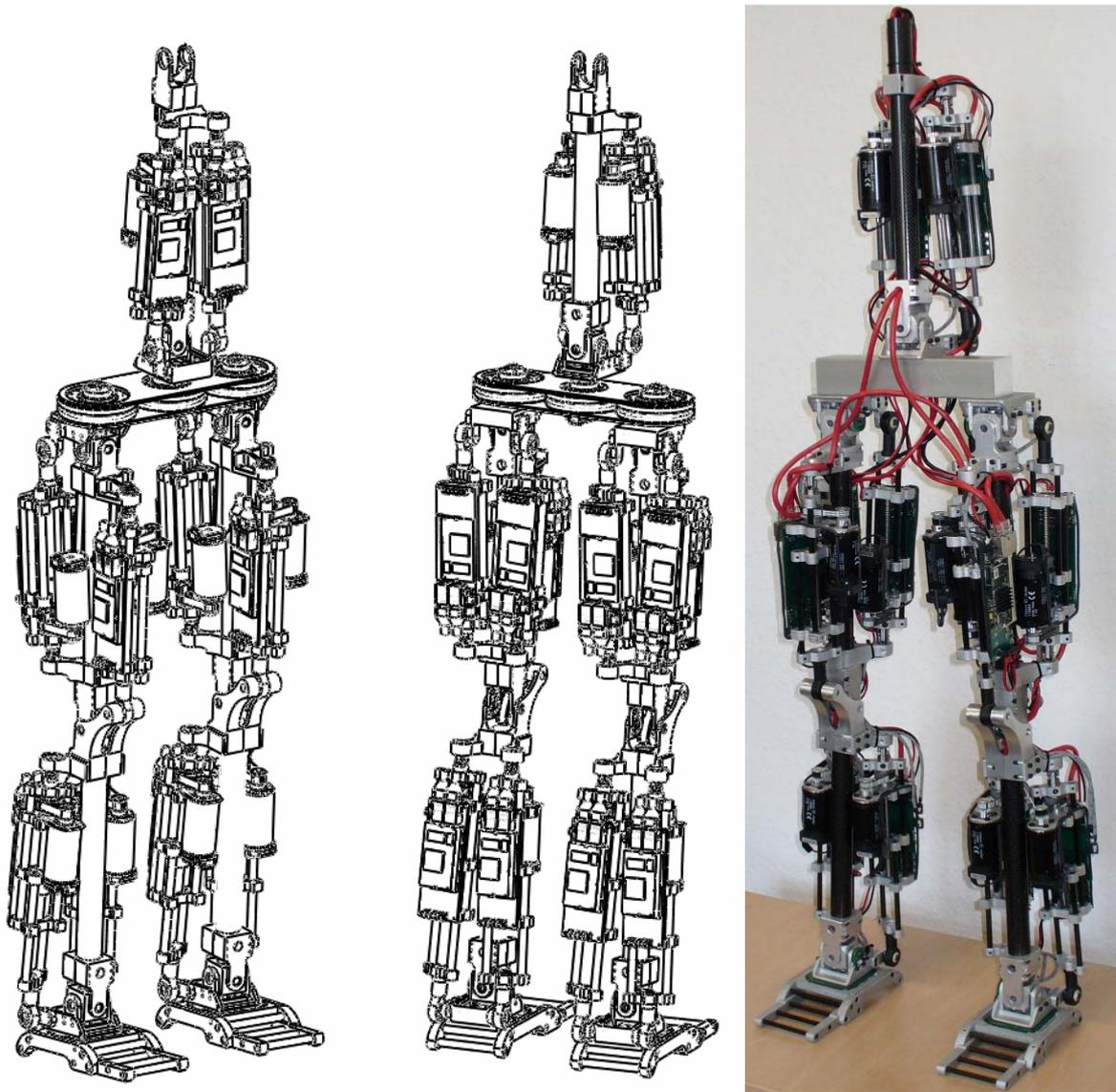


Abb. 2.12 – CAD – Entwurf und Realisierung des zweibeinigen mobiler Roboters ROTTO

2.3.2 Hüftgelenk

Die Konstruktion des Hüftgelenks ist ähnlich dem Sprunggelenk und dem Körpergelenk in Form einer parallelen Kinematik ausgeführt. Zwei Linearantriebe setzen mittels Schubstangen und Kugelgelenke das Roboterbein in Bewegung. Die Extension bzw. Flexion des Hüftgelenks erfolgt durch die synchrone Ansteuerung der Linearantriebe in gleiche Richtung. Eine Adduktion bzw. Abduktion ist durch synchrone Ansteuerung der Linearantriebe in entgegen gesetzter Richtung möglich.

Die Linearantriebe sind von einer Seite mittels eines kompakten Universalgelenks an dem tragenden Kohlefaserrohr des Oberschenkels befestigt. An der anderen Seite übertragen die Schubstangen die Kraft des Linearantriebes durch ein Kugelgelenk an ein Befestigungsbauteil. Der Kraftfluss schließt sich über das spezielle Universalgelenk, das das Hüftgelenk verkörpert. Das Universalgelenk weist in der Mitte eine große Bohrung auf, die für Durchführung der Kabel verwendet wird. Außerdem sind in diesem Gelenk zwei magnetische Winkelgeber integriert, die die Gelenkwinkel berührungslos erfassen und in digitaler Form

bereitstellen. Das erwähnte Befestigungsbauteil ermöglicht eine zusätzliche Verstellung des Hebelarmes für jeden der beiden Linearantriebe und beeinflusst dadurch den verfügbaren Arbeitsraum sowie das verfügbare Drehmoment im Hüftgelenk.

Die vertikale Achse des Hüftgelenks ermöglicht eine Innen- bzw. Außenrotation des gesamten Beines und wird mit Hilfe eines Getriebemotors angetrieben. Aufgrund des wesentlich geringeren erforderlichen Drehmoments wurde bei dieser Antriebseinheit auf eine Fertigungskomponente zurückgegriffen.

Abbildung 2.13 zeigt konstruktive Umsetzung des Hüftgelenks für zweibeinigen Roboter ROTTO.

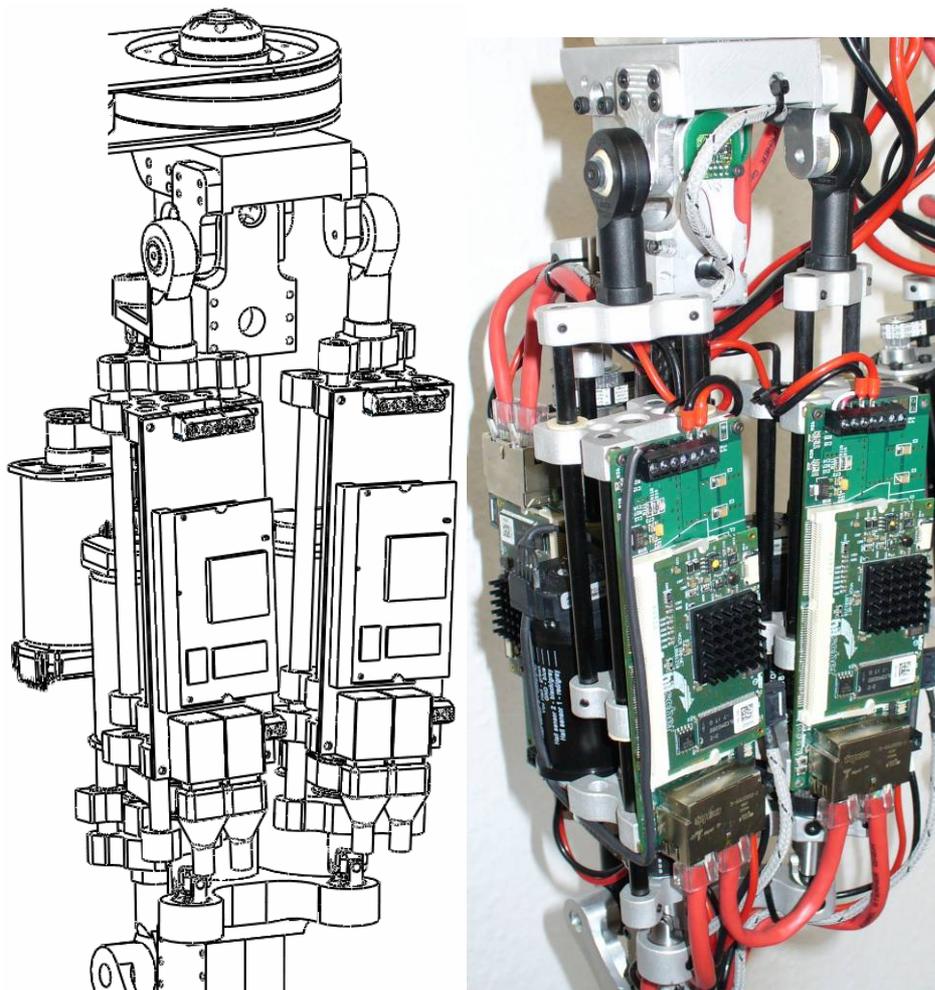


Abb. 2.13 – Konstruktive Umsetzung des Hüftgelenks für zweibeinigen Roboter ROTTO

2.3.3 Kniegelenk

Der Konstruktion des Kniegelenks wurde ebenfalls ein Linearantrieb zu Grunde gelegt, der mittels Schubstange der Unterschenkel in Bewegung setzt. Der Linearantrieb ist ähnlich wie die anderen Antriebe von einer Seite mittels eines kompakten Universalgelenks an dem tragende Kohlefaserrohr des Oberschenkels befestigt. An der anderen Seite überträgt die Schubstange die Kraft des Linearantriebes an ein Befestigungsbauteil des Unterschenkels. Die Position des Kniegelenks wird mit Hilfe eines magnetischen Winkelgebers berührungslos

Damit der Roboter in einer Umgebung mit dem Menschen erfolgreich agieren kann (z.B. Treppen steigen), muss der Roboterfuß verglichen mit dem menschlichen Fuß eine ähnliche Größe haben. Des Weiteren müssen die Anstoßkräfte im Fuß durch eine weiche Sohle reduziert bzw. gedämpft werden, um Beschädigungen des Roboters oder des Untergrundes zu begrenzen.

Eine abrollende Bewegung statt einer flachen An-/Abstoßbewegung des Fußes ist insbesondere für einen effizienten, „natürlichen“ Gang vom Vorteil. Deswegen muss die Ferse ein rundes Profil zeigen.

Die dargestellten Merkmale wurden bei der konstruktiven Auslegung der Füße für zweibeinigen Roboter ROTTO berücksichtigt. Zur Messung der auf den Fuß einwirkenden Kräfte und Momente wurde ein 6-komponenten Kraft-/Momentsensor in die Fußkonstruktion integriert. Die Auslegung und Untersuchung dieses Sensors ist in nachfolgendem Unterkapitel detailliert beschrieben.

Die Ansteuerung des Sprunggelenks ist, ähnlich dem Hüftgelenk, in Form einer parallelen Kinematik ausgeführt. Zwei Linearantriebe setzen mittels Schubstangen und Kugelgelenke den Roboterfuß in Bewegung. Hier wird die Extension bzw. Flexion des Sprunggelenks durch synchrone Ansteuerung der Linearantriebe in gleiche Richtung erreicht. Eine Adduktion bzw. Abduktion ist durch synchrone Ansteuerung der Linearantriebe in entgegen gesetzter Richtung möglich. Die Position des Sprunggelenkes wird mit Hilfe zweier magnetischer Winkelgeber berührungslos erfasst und durch eine digitale Schnittstelle in das Steuerungssystem eingelesen.

Abbildungen 2.15 und 2.16 zeigen konstruktive Umsetzung des Sprunggelenks und des Fußes für zweibeinigen Roboter ROTTO.

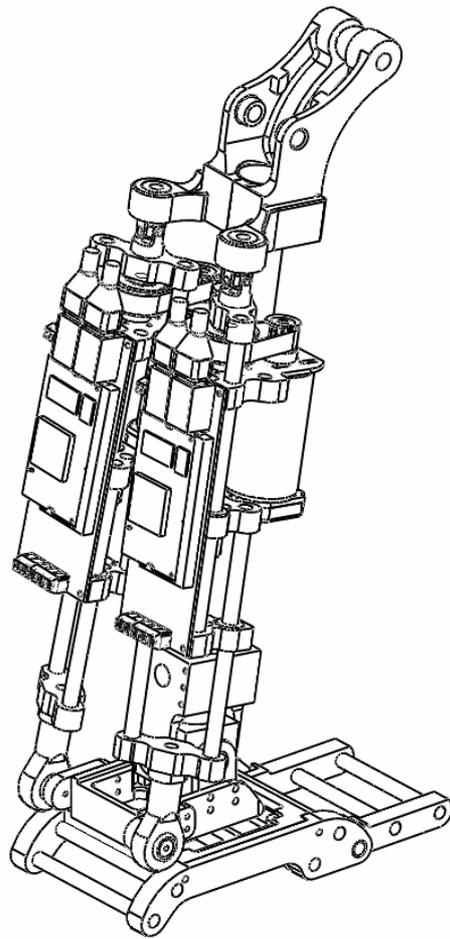


Abb. 2.15 – Konstruktive Umsetzung des Sprunggelenks für zweibeinigen Roboter ROTTO

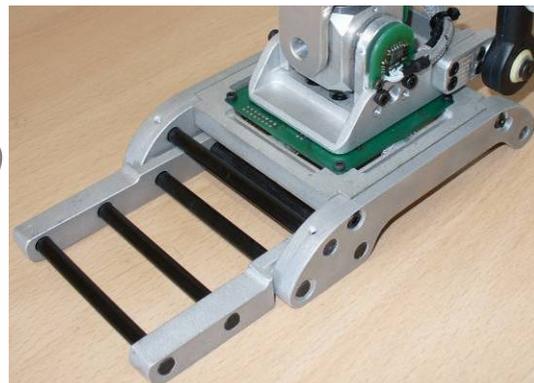
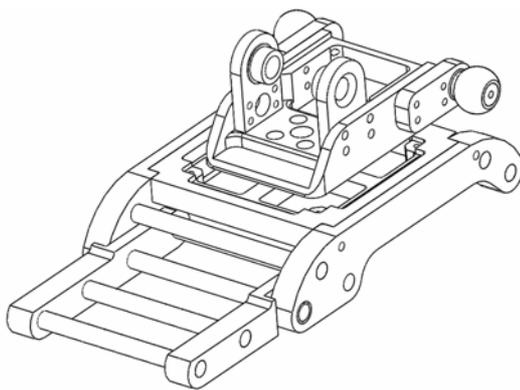


Abb. 2.16 – Konstruktive Umsetzung des Fußes mit integriertem Kraft-/Momentsensor für zweibeinigen Roboter ROTTO

2.4 Technische Daten der Roboterkonstruktion

In diesem Unterkapitel werden einzelne technische Details über die Konstruktion des sechsbeinigen Roboters ANTON bzw. des zweibeinigen Roboters ROTTO zusammengefasst.

In Tabelle 2.5 ist die Gewichtsverteilung des sechsbeinigen mobilen Roboters ANTON bezüglich seiner einzelnen Baugruppen angegeben.

In Tabelle 2.6 sind die funktionellen Teilkomponenten des mobilen Roboters ANTON nach ihrem jeweiligen Gewichtsanteil aufgelistet. Trotz intensiver Bemühungen, eine gewichtsarme Struktur zu realisieren, liegt deren Gewichtsanteil bei 57,8 %. Dies ist offensichtlich mit einer großen Anzahl Freiheitsgrade und deren konstruktiver Umsetzung zu begründen. Zu Lasten der Motoren geht der nächst größere Gewichtsanteil.

Tabelle 2.5. Gewichtsverteilung mobiler Roboter ANTON

Gesamtgewicht	Gramm (g)	Anteil in %
Unterschenkel mit Fuß	6 x 125	11
Oberschenkel	6 x 160	14
Differenzialgelenk	9 x 90	12
Körpersegment	3 x 1270	55
Kamerakopf	1 x 170	2
Elektronische Baugruppen	3 x 150	6
Insgesamt	6.950	100

Tabelle 2.6. Teilkomponenten mobiler Roboter ANTON

Teile	Gesamtgewicht	Anzahl
Motoren	1280 g	24
Getriebeeinheiten	1200 g	24
Konstruktion	4020 g	1
Elektronische Baugruppen	450 g	3

Tabelle 2.7 gibt eine Übersicht über die Gewichtsverteilung des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO bezüglich seiner einzelnen Baugruppen.

Tabelle 2.7. Gewichtsverteilung mobiler Roboter ROTTO

Gesamtgewicht	Gramm (g)	Anteil %
Fuß mit Kraftsensor	2 x 380	6
Unterschenkel	2 x 1630	27
Oberschenkel	2 x 2390	40
Becken	1 x 890	7
Oberkörper	1 x 1780	15
Elektronische Baugruppen	12 x 45	5
Insgesamt	12.010	100

In Tabelle 2.8 sind die funktionellen Teilkomponenten des mobilen Roboters ROTTO nach ihrem jeweiligen Gewichtsanteil aufgelistet. Dank zahlreicher Optimierungsschritte während der Entwicklung an der Konstruktion und an deren Bestandteilen ist es gelungen, eine

gewichtsarme Struktur zu realisieren. Der Gewichtsanteil der tragenden Struktur des Roboters liegt bei 30,6 %. Der größte Gewichtsanteil geht zu Lasten der Getriebeeinheiten. Dies ist offensichtlich mit einer großen Anzahl der Freiheitsgrade und großer Antriebsleitung zu begründen.

Tabelle 2.8. Teilkomponenten mobiler Roboter ROTTO

Teile	Gesamtgewicht	Anzahl
Motoren	3240 g	12
Getriebeeinheiten	4560 g	12
Konstruktion	3670 g	1
Elektronische Baugruppen	540 g	12

Um möglichst präzise Simulationsergebnisse zu erhalten, wurden einzelne Systemparameter wie Massen und Trägheitstensenoren der Teilkomponenten über detaillierte Modellierungen der Form und Materialeigenschaften mit CAD/CAE-Werkzeugen ermittelt. Des Weiterem werden die ermittelte Systemparameter direkt für die Generierung der optimalen Bewegungstrajektorien (s. Kapitel 4) benutzt. Bei der Umsetzung modellbasierter Regelungskonzepte werden die dargestellten Systemparameter ebenfalls gebraucht. Durch wiegen wurden die Massen der Bauteile weiterhin präzisiert. Diese Methodik erlaubt schnelle Korrekturen der Systemparameter bei möglicher Auswechslung der Bauteile oder Änderungen der Konstruktion ohne aufwendige experimentelle Methoden heranzuziehen.

2.5 Kraftsensoren

Kraftsensoren spielen eine der wichtigsten Rollen im Bereich Robotik immer dann, wenn eine präzise Abarbeitung der Solltrajektorie im Kontakt mit irgendeinem vorgegebenen oder voraus unbekanntem Objekt notwendig ist [23 - 25, 63, 107]. Die Kontaktkraftinformation ist hierbei in die Regelungsstruktur mit eingeschlossen um neue Eigenschaften wie Nachgiebigkeit, Adaptivität usw. dem Robotersystem zu verleihen.

Die Konstruktion des Kraftsensors muss vielen wichtigen Anforderungen entsprechen. Ein Kraftsensor im Fuß eines schreitenden Roboters soll möglichst klein sein, um dessen Integration in die Roboterkonstruktion in einfacher Weise zu ermöglichen. Eine weitere Anforderung ist die Genauigkeit der Messung und die Empfindlichkeit des Sensors.

Um möglichst viele Informationen über das Objekt und seine Kontakteigenschaften zu bekommen, soll ein Kraftsensor eine oder mehrere Komponenten des Kontaktkraftvektors messen. Außerdem können mit Hilfe von Kraft-/Momentsensoren auch andere wichtige Aussagen über Stabilität und Kraftverteilung gewonnen werden. Durch die Vermessung der Kräfte und Momente kann nicht nur die Position des *zero moment point* (ZMP) in zwei Dimensionen gemessen, sondern auch der Übergang zwischen Haft- und Gleitreibung erfasst werden. Unebenheiten des Untergrundes können relativ leicht erfasst und vermessen werden.

Eine Analyse existierenden Prototypen des mobilen Roboters zeigt, dass sich zur Zeit drei Aufbaumuster für Roboterfüße etabliert haben:

Sensorlose Füße: Eine Vielzahl mobilen Roboter haben gar keine Kraftsensoren in Füßen. Diese bewegen sich mit Hilfe von im Voraus berechneten Trajektorien. Die Information über die Stabilität des Roboters wird mit Hilfe von anderen Gebern, wie Inertialsensoren, Kameras, Gelenkdrehmomentsensoren usw., ermittelt. Zu dieser Gruppe gehören auch Roboter, deren Füße nur mit einem einfachen „Kontakt“-Sensor ausgestattet sind.

Füße mit **drei und mehr Kraftmesszellen** für vertikale Komponenten der Reaktionskräfte: Oft werden in Roboterfüßen industrielle Kraftmesszellen an den Kontaktpunkten des Fußes angebracht, um die vertikale Komponente der Kraft in diesen Punkten zu messen. Dieser Aufbau ist sehr beliebt, da man auf fertige industrielle Kraftsensoren zurückgreifen kann und die Sensoren alle notwendigen Daten zur Bestimmung der ZMP Position aus Kraftverteilung über Kontaktpunkte liefern. Diese Information kann effizient zur Stabilisierung der Bewegung des Roboters verwendet werden. Allerdings kann die ZMP Position nur dann richtig ermittelt werden, wenn alle Sensoren in Kontakt mit der Oberfläche sind. Das hat eine negative Auswirkung auf die Dynamik des Ganges.

Füße mit **mehrkomponenten Kraft-/Drehmomentsensoren:** Wegen des hohen technischen Aufwands wird diese Variante relativ selten verwendet. Allerdings bietet diese Art von Sensoren zusätzliche Information über Kräfte und Drehmomente im Fuß, die eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung von fortgeschrittenen Steuerungs- bzw. Stabilisierungsalgorithmen spielen. Die Information über die Änderung in horizontalen Komponenten der Kräfte kann zur Detektierung des Übergangs zwischen Haft- und Gleitreibung genutzt werden. Über die gemessenen Kräfte- bzw. Drehmomente im Fuß können mit Hilfe von Jakobi-Matrizen die Drehmomente in Gelenken berechnet werden.

2.5.1 Der 6-Komponenten Kraft-/Drehmomentsensor

Basierend auf der oben dargestellten Analyse wurde für den Einsatz im zweibeinigen Roboter ROTTO ein 6-Komponenten Kraft-/Drehmomentsensor ausgewählt.

Wie bereits erwähnt kann die ZMP Position bei der Vermessung von vertikalen Komponenten der Reaktionskräfte in den Kontaktpunkten nur dann ermittelt werden, wenn alle Kraftmesszellen im Kontakt mit Untergrund sind. Mit einem sechskomponenten Kraft-/Drehmomentsensor ist es möglich die ZMP Position auch bei der rollenden Bewegung des Roboters über die Ferse oder Fußspitze zu erfassen.

Bei einer dynamischen Bewegung kann ein Roboter deutlich größere Kräfte entwickeln, als sein Eigengewicht darstellt. Deswegen wurde der Sensor im Roboterfuß für einen größeren Messbereich entwickelt. Als maximal erlaubte vertikale Kraft wurden bis zu 600 N angenommen. Dementsprechend wurden für die tangentielle Kraftkomponente maximale Werte bis zu 400 N und laterale bis zu 200 N gewählt. Die Drehmomente im Roboterfuß sind hauptsächlich durch die maximale Antriebsdrehmomente von 70 Nm im Sprung- und Hüftgelenk und dynamischer Last begrenzt. Diese Richtwerte wurden bei der Auslegung und Optimierung des 6-komponenten Kraft/Drehmomentsensor verwendet. Der entwickelte Sensor ist in Abbildung 2.17 dargestellt. Der Sensor ist in Form eines kreuzförmigen, federnden Elements ausgelegt und besteht aus 4 radialen Balken (1), die den robusten zentralen Flansch (2) mit dem äußeren Flansch (3) verbinden.

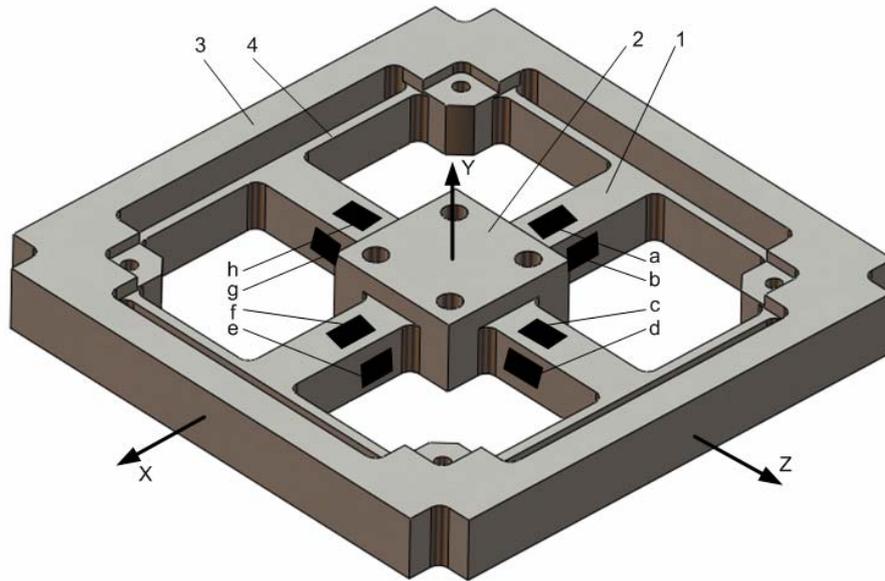


Abb. 2.17 - Kreuzförmiges federndes Element

Weiter unten werden die Eigenschaften des Sensors dargestellt und Auslegung der wichtigsten Parameter beschrieben.

Robustheit. Wegen der Symmetrie des federnden Elementes (Abb. 2.17) hat der Sensor eine diagonale Robustheitsmatrix.

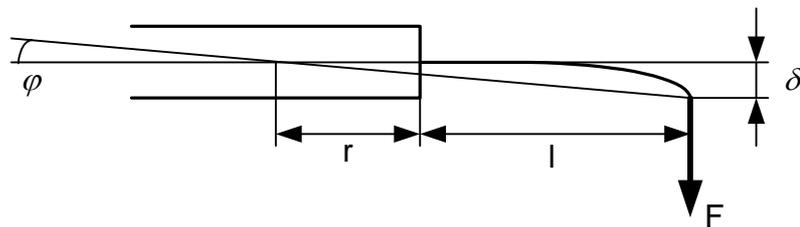


Abb. 2.18 - Krümmung des Balkens

Die äußeren Enden jedes federnden Balkens können aufgrund der mechanischen Auslegung als frei betrachtet werden (s. Abb. 2.18). Dabei ergibt sich eine Verschiebung δ des Balkens bezüglich des inneren Flansches des Sensors als:

$$\delta = \frac{F}{E \cdot h^4} \cdot 4l^3 \quad (2.1)$$

wobei F – die Kraft, E – der Elastizitätsmodul und h – der Balkenquerschnitt sind.

Der Zusammenhang zwischen den Verschiebungen und der Kräfte wird auf folgender Weise ermittelt:

$$F_x = \delta_x E h^4 / (2l^3) \quad (2.2)$$

$$F_y = \delta_y E h^4 / (2l^3) \quad (2.3)$$

$$F_z = \delta_z E h^4 / (2l^3) \quad (2.4)$$

Bei der Rotation des inneren Flansches um die Achsen O_X und O_Z wird das Gegendrehmoment durch die Deformation (Dehnung) der entsprechenden abaxialen Balken bestimmt. Die Verschiebung der Balkenseiten bezüglich des inneren Flansches ist bei einer Rotation um Winkel φ durch $\delta = L \cdot \varphi$ bestimmt. Das Gegendrehmoment ist gleich $M = F \cdot L$. Für einen Balken gilt:

$$M = \varphi \frac{c}{l} = \varphi \frac{2(1+\mu)}{l \cdot 0.1406} E h^4 \quad (2.5)$$

Wobei $c = 0.1406 \cdot G h^4 = \frac{0.1406 \cdot E h^4}{2(1+\mu)}$, G - Verschiebungsmodul, μ - Poisson'sche Zahl, Längen $L=r+l$; $\alpha=r/l$ sind.

Die Rotation um die Achse O_Y ergibt:

$$M_x = 2L \varphi_x L \frac{E h^4}{4l^3} + 2\varphi_x \frac{2(1+\mu)}{l \cdot 0.1406} E h^4 = \varphi_x E h^4 \left[\frac{L^2}{2l^3} + \frac{4(1+\mu)}{l \cdot 0.1406} \right] \quad (2.6)$$

$$M_z = \varphi_z E h^4 \left[\frac{L^2}{2l^3} + \frac{4(1+\mu)}{l \cdot 0.1406} \right] \quad (2.7)$$

$$M_y = \varphi_y E h^4 L^2 / l^3 \quad (2.8)$$

Nach den Gleichungen (2.6), (2.7) und (2.8) wird die Robustheitsmatrix ermittelt:

$$K^{-1} = \text{diag} \left\{ \frac{(1+\alpha)^3}{2}, \frac{(1+\alpha)^3}{2}, (1+\alpha)^3, \frac{(1+\alpha)^3}{2} + \frac{0.1406(1+\alpha)}{1+\mu}, \right. \\ \left. \frac{(1+\alpha)^3}{2} + \frac{0.1406(1+\alpha)}{1+\mu}, (1+\alpha)^3 \right\} \quad (2.9)$$

Empfindlichkeit. Der Sensor verfügt über 8 Messkanäle. Insgesamt 8 Paar Dehnungsmessstreifen (DMS) (a bis h bezeichnet s. Abb.2.17) bilden 8 Halbbrücken. Die Empfindlichkeitsmatrix S wird auf folgender Weise bestimmt. Beim Einlegen der Seitenkraft F_X werden zwei Balken (in O_X -Richtung) gekrümmt und dementsprechend zwei DMS Sensoren (e und h) gedehnt. Für die Deformation der Dehnungsmessstreifen gilt:

$$\varepsilon_{e1} = -\varepsilon_{e2} = \frac{F_x}{2} \frac{3}{4} l \frac{h}{4} \frac{12}{E h^4} = \frac{9 F_x l}{4 E h^3}, \quad \varepsilon_{h2} = -\varepsilon_{h1} = \frac{9 F_x l}{4 E h^3} \quad (2.10)$$

Die mittlere Deformation in den entsprechenden Brücken ist (mit $l = L/(1 + \alpha)$):

$$e_e = -e_h = \frac{9F_x L}{8Eh^3} \frac{1}{1 + \alpha} \quad (2.11)$$

Die Deformation, die bei der Einwirkung der Seitenkraft F_z entsteht, wird durch ähnliche Gleichungen beschrieben. Mittlere Deformationen in b und f:

$$e_b = -e_f = \frac{9F_z L}{8Eh^3} \frac{1}{1 + \alpha} \quad (2.12)$$

Die Einwirkung der Kraft F_y wird auf vier Balken mit DMS Sensoren a, c, e und g verteilt:

$$e_a = e_c = e_e = e_g = \frac{9F_y L}{16Eh^3} \frac{1}{1 + \alpha} \quad (2.13)$$

Auf die Einwirkung des Seitendrehmomentes M_x sind DMS Sensoren c und g empfindlich. Der innere Flansch wird im Bezug auf den äußeren Flansch um den Winkel φ_z gedreht (vgl. Gleichung 2.8). Dieser Biegung entspricht die Verschiebung der Balkenseite $\xi = \varphi_z \cdot L$. Die Deformation der DMS beträgt dabei

$$\varepsilon_{c1} = -\varepsilon_{c2} = Fl \frac{3}{4} \frac{h}{2} \frac{1}{Eh^4} = \pm \frac{9M_x}{4Eh^3} \frac{Ll}{[L + 0.2812/(1 + \mu)]} \quad (2.14)$$

Für die mittlere Deformationen unter Berücksichtigung von $l = L/(1 + \alpha)$ gilt:

$$e_c = -e_g = \frac{9M_x}{4Eh^3} \frac{1 + \alpha}{[(1 + \alpha)^2 + 0.2812/(1 + \mu)]} \quad (2.15)$$

Ähnlich werden die Deformationen der DMS unter der Einwirkung von Drehmoment M_z gefunden:

$$e_a = -e_e = -\frac{9M_z}{4Eh^3} \frac{1 + \alpha}{[(1 + \alpha)^2 + 0.2812/(1 + \mu)]} \quad (2.16)$$

Die Einwirkung des Drehmoments M_y wird durch das Aufteilen auf vier Kräfte $F = M_y/(4L)$ erfasst. Die Deformationen der DMS b, d, f und h werden nach folgender Formel berechnet:

$$e_b = e_d = e_f = e_h = \frac{9M_y}{16Eh^3} \frac{1}{1 + \alpha} \quad (2.17)$$

Aus den Formeln (2.11) bis (2.17) wird die Empfindlichkeitsmatrix S ermittelt:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & s_1 & 0 & s_2 & 0 \\ 0 & 2s_1 & 0 & 0 & 0 & s_1 \\ 0 & 0 & s_1 & s_2 & 0 & 0 \\ 2s_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_1 \\ 0 & 0 & s_1 & 0 & -s_{21} & 0 \\ 0 & -s_1 & 0 & 0 & 0 & s_1 \\ 0 & 0 & s_1 & -s_2 & 0 & 0 \\ -2s_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

wobei $s_1 = \frac{9}{8(1+\alpha)}$ und $s_2 = \frac{9}{4} \cdot \frac{1+\alpha}{[(1+\alpha)^2 + 0.2812/(1+\mu)]}$ ist.

Einzelne Komponenten der Kraft und des Drehmoments werden aus folgender Gleichung ermittelt:

$$[\vec{u}] = \chi \cdot u_0 \cdot \frac{L}{E \cdot h^3} \cdot S \cdot \begin{bmatrix} \vec{F} \\ \vec{M} / L \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Aus dieser Information kann auch die exakte Position eines resultierenden Kraftvektors unter dem Fuß berechnet werden. Diese Position ist ein wichtiger Kennwert, der zur Stabilisierung und Gleichgewichtserhaltung des gesamten Roboters benutzt werden kann. Anhand der Ergebnisse der FEM-Analyse werden die Abmessungen des Kraftsensors sowie die Klebposition der DMS optimiert. Die Anwendung von Dehnungsmessstreifen ist die am meisten verbreitete Methode zur experimentellen Bestimmung von Dehnungen und daraus berechenbaren Spannungen von Bauteilen. Die durch die Dehnung des DMS entstehende Widerstandsänderung lässt sich am besten mit einer wheatstonischen Brückenschaltung messen.

Nachfolgend werden zwei ausgewählten Konstruktionen mit Hilfe einer FEM-Analyse untersucht. Als erstens wird eine FEM-Analyse für ein kreuzförmigen federnden Element durchgeführt. Diese Konstruktion kann bei entsprechender Anbringung der DMS für die Vermessung der 3 Komponenten der einwirkenden Kraft sowie der 3 Komponenten des Drehmoments verwendet werden.

Durch die Einwirkung einer Kraft F_Z sowie eines Drehmoments M_Y wird der Festkörper auf vier radialen Balken deformiert, wodurch positive und negative Dehnungen (Stauchungen) entstehen. Diese Dehnungen werden an jedem Balken mit je vier Dehnungsmessstreifen gemessen und in ein zur Kraft proportionales elektrisches Signal umgewandelt. In Abbildung 2.19 ist das Modell des Sensors unter der Drehmomenteinwirkung (oben) bzw. der Krafteinwirkung (unten) dargestellt.

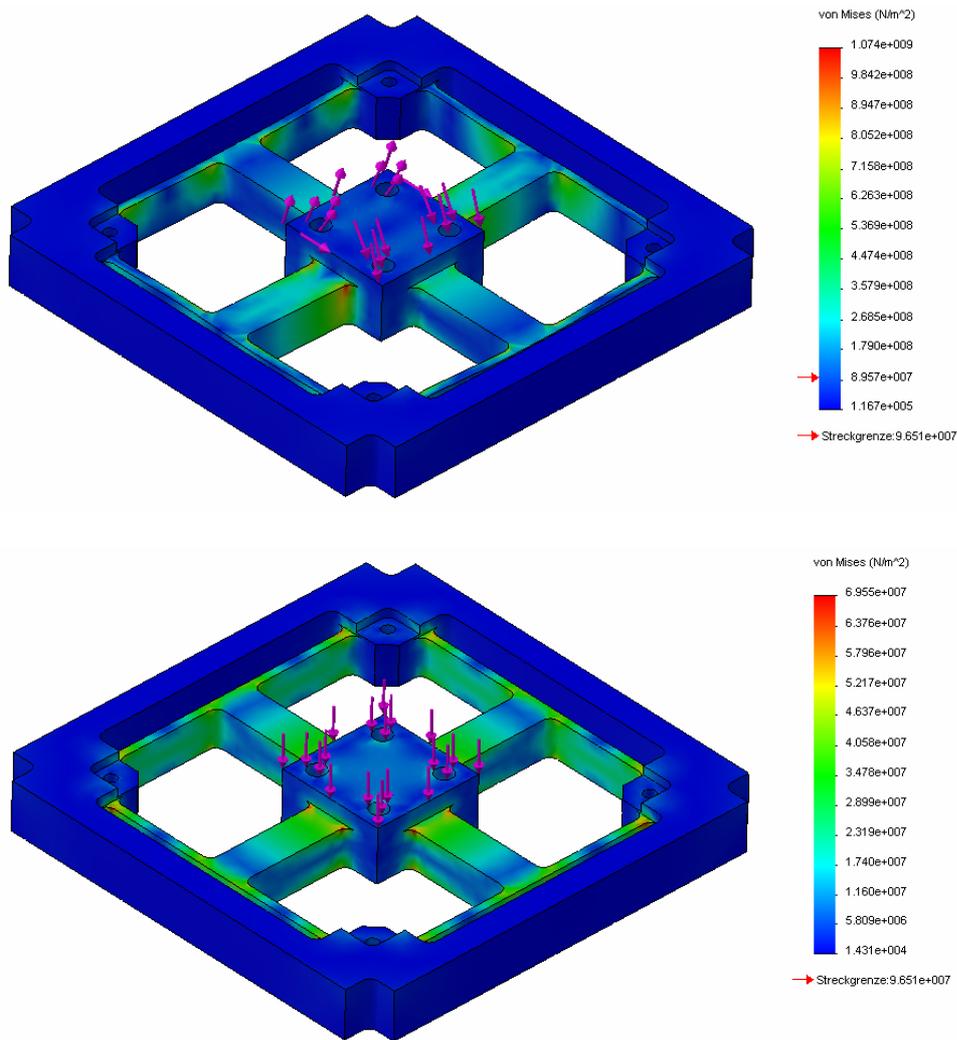


Abb. 2.19 - FEM-Analyse des kreuzförmigen Elements

Als Ergebnis der oben dargestellten Untersuchungen wurde ein Prototyp des Kraftsensors entwickelt und in den Roboterfuß integriert. Der Prototyp des 6-komponenten Kraft-/Drehmomentsensors ist in Abbildung 2.21 dargestellt. Der Versuchsaufbau des Roboterfußes wurde bereits in Abbildung 2.16 gezeigt.

2.5.2 Der 3-Komponenten Kraftsensor

Der 3-komponenten Kraftsensor für den sechsbeinigen mobilen Roboter ANTON wurde nach einem ähnlichen Verfahren zur Messung der Reaktionskräfte unter jedem Roboterfuß im Kontakt entwickelt. Die Abbildung 2.20 zeigt die FEM-Analyse bei der Optimierung des Sensors.

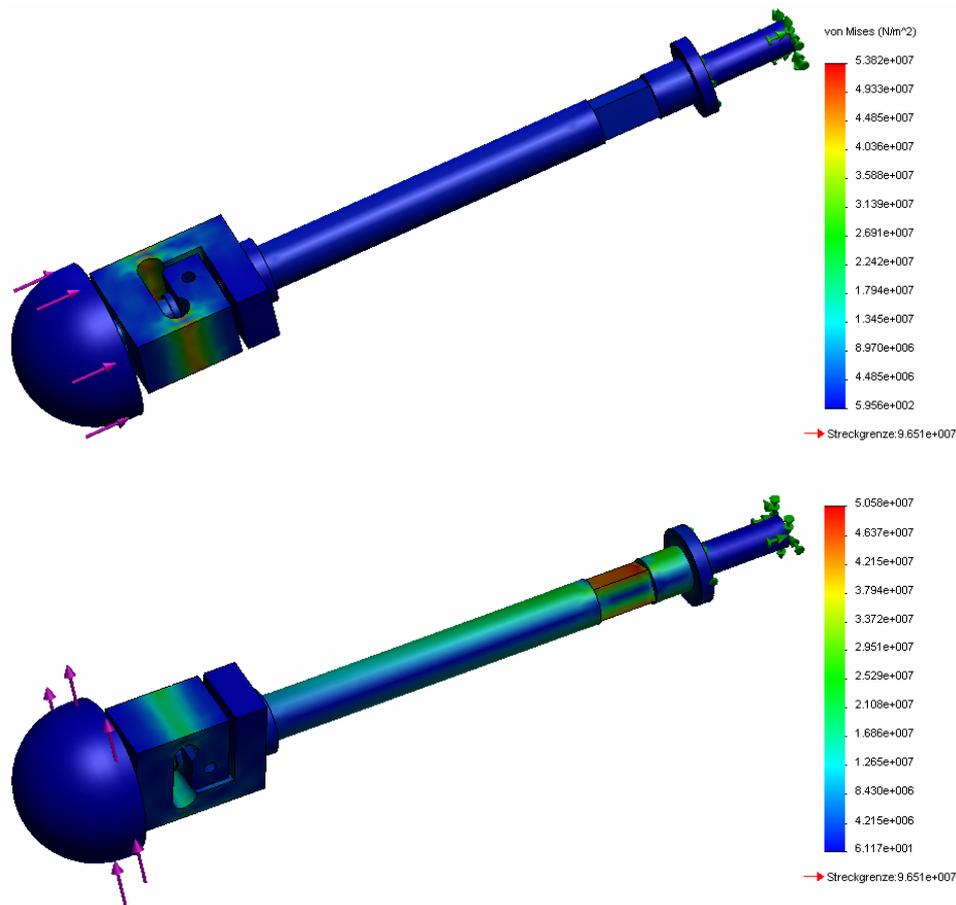


Abb. 2.20 - FEM-Analyse des 3-komponenten Kraftsensors für mobilen Roboter ANTON

2.5.3 Realisierung und Verifikation der Kraftsensoren

Der 3-komponenten Kraftsensor für den mobilen Roboter ANTON besteht aus zwei miteinander verschraubten Teilen, einem Stab und einem Biegeelement. Die Längskomponente der Stützkraft in Beinrichtung wird mit Hilfe des Biegeelementes erfasst, welches die Form einer Parallelogrammfeder hat. Mit Hilfe applizierter Dehnungsmessstreifen wird die Längskomponente F_z gemessen. Die beiden Querkraftkomponenten werden über die Biegedeformation des Stabes erfasst. Der Stab ist an einer Seite am Biegeelement, an der anderen Seite am Kniegelenk befestigt. Am oberen Ende des Biegestabs sind 4 DMS in orthogonalen Messrichtungen appliziert, welche die Komponenten F_x und F_y messen. Die positive Kraftrichtung fällt dabei jeweils mit der positiven Koordinatenrichtung des Kniegelenk-Koordinatensystems zusammen. Die Aufnehmerempfindlichkeit beträgt – zusammen mit dem integrierten Messverstärker – ca. 0,1 V/N. Das Übersprechen zwischen den Kanälen beträgt maximal 1,5 %. In Abbildung 2.21 sind die fertigen Kraftsensoren dargestellt.

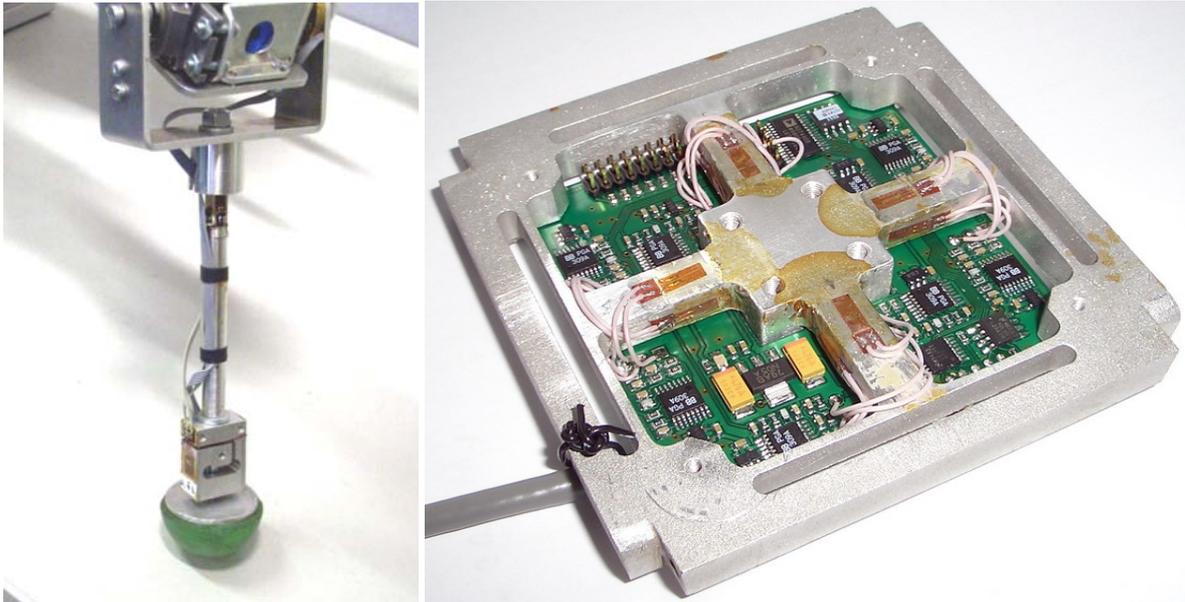


Abb. 2.21 - 6-komponenten Kraft-/Drehmomentsensor mit Elektronik und 3-komponenten Kraftsensor mit Elektronik

Die Kalibrierung der Kraftsensoren hat das Ziel, die Teilkomponenten der Empfindlichkeitsmatrix S (2.18) zu bestimmen.

Mit präzisen Messgewichten wurden die Sensoren mit entsprechender Kraft- bzw. Drehmoment statisch belastet. Die resultierenden Kennwerte wurden zur Ermittlung der Genauigkeit und Auflösung sowie weiterer Parameter der Sensoren verwendet. Tabelle 2.9 zeigt die wichtigsten Parameter der entwickelten Kraftsensoren.

Tabelle 2.9. Parameter der Kraftsensoren

Parameter	6-komponenten Kraft/Moment Sensor				3-komponenten Kraftsensor	
	F_x, F_y	F_z	M_x, M_y	M_z	F_x, F_y	F_z
Auflösung [bit]	12	12	12	12	12	12
Genauigkeit [N],[Nm]	0,29	0,39	0,098	0,02	0,029	0,042
Messbereich [N],[Nm]	±300	±400	±10	±20	±15	-3..+40
Wiederholbarkeit [%]	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,6	<0,6

Die Verifikation der aufgebauten Kraft- bzw. Kraft/Drehmomentsensoren erfolgte sowohl mit Hilfe präziser Messgewichte als auch durch die Vermessung und sorgfältige Prüfung der gemessenen Komponenten der Kräfte bzw. Drehmomente im Laufe mehrerer Experimente. Abbildungen 2.22 und 2.23 zeigen die gemessene Komponenten der Reaktionskräfte unter verschiedenen Beinen eines sechsbeinigen Roboters ANTON bzw. Dehnungen und daraus errechnete Kraft-/Drehmomentkomponenten im Fuß des zweibeinigen Roboters ROTTO.

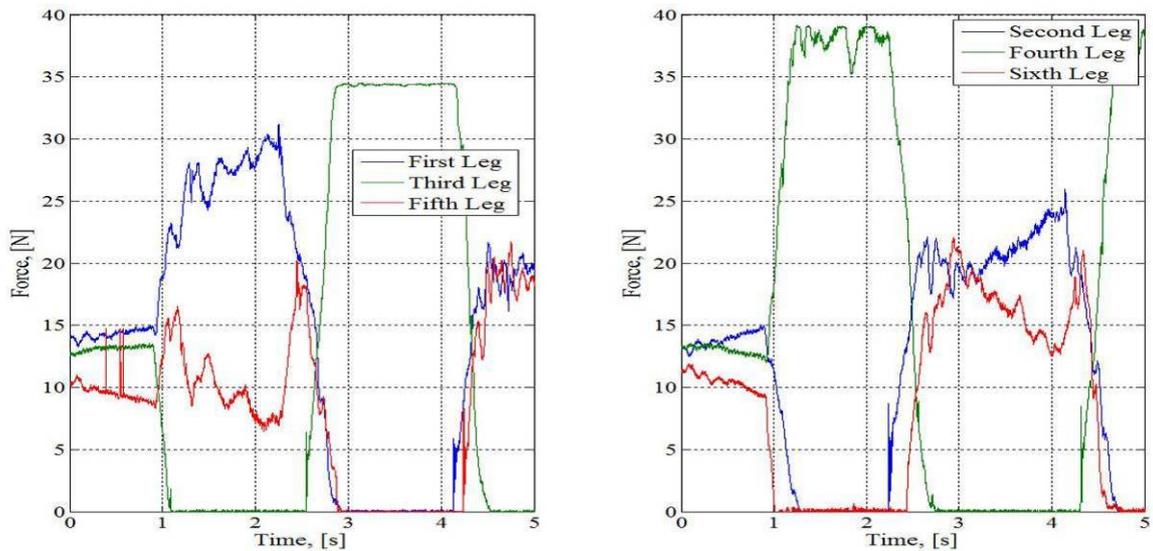


Abb. 2.22 – Verteilung der einwirkenden Reaktionskräfte unter den jeweiligen Roboterbein gemessen mit Hilfe von 3-komponenten Kraftsensoren bei einem Tripodgang-Experiment mit dem sechsbeinigen mobilen Roboter ANTON

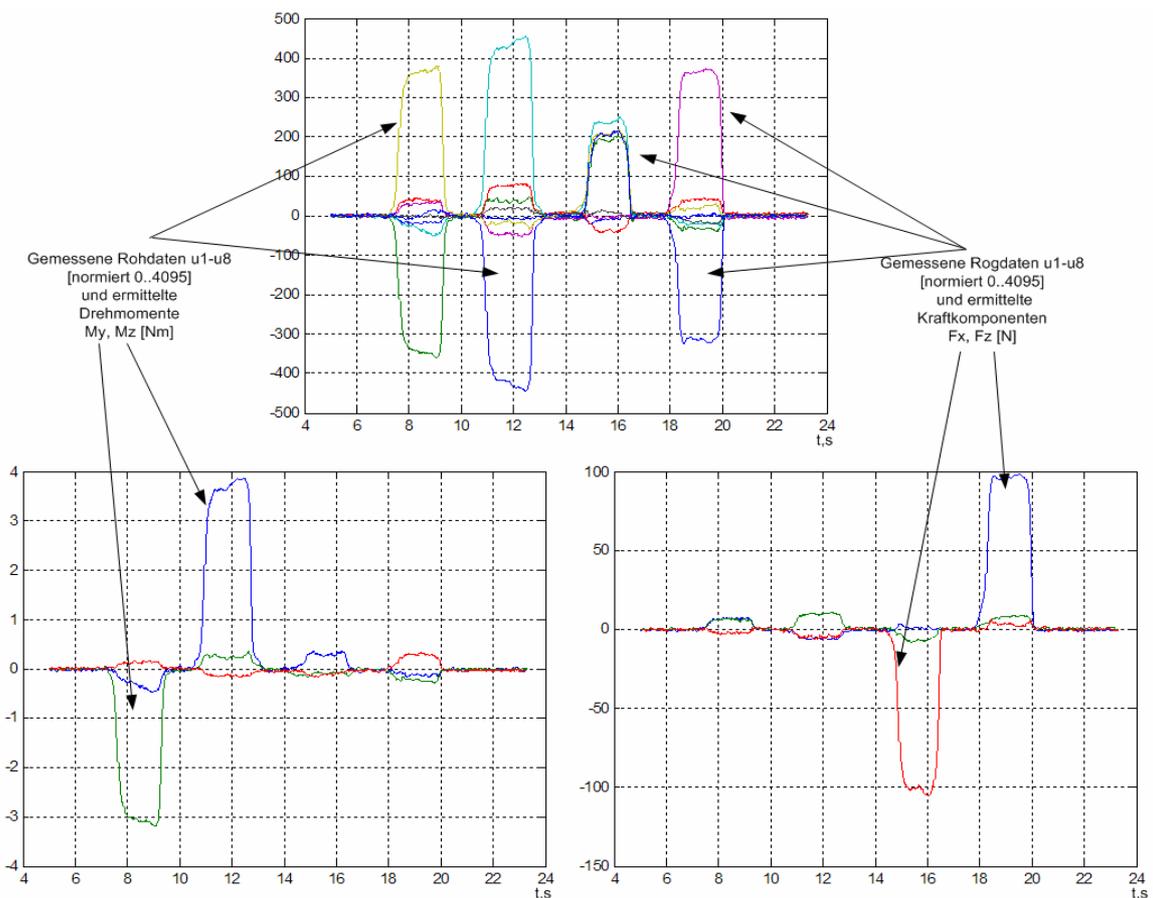


Abb. 2.23 – Verlauf der in den jeweiligen Halbbrücken gemessenen Dehnungen während der Einwirkung der Kräfte F_X und F_Z sowie der Drehmomente M_Y und M_Z (oben); entsprechende mittels Empfindlichkeitsmatrix ermittelte Komponenten der Kraft bzw. des Drehmoments (unten) bei einem Experiment mit den 6-komponenten Kraft/Drehmomentsensor für den zweibeinigen Roboter ROTTO

2.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zunächst Methoden zum Entwurf mechatronischer Systeme vorgestellt. Die diskutierten Entwurfsschritte wurden bei der Entwicklung der dargestellten mehr- und zweibeinigen mobilen Roboter angewendet. Bei dem bevorzugtem „concurrent engineering“ Verfahren wurden moderne Rechen- und Softwaretools in allen Bereichen der Systementwicklung stark einbezogen.

Zu einzelnen Roboterkomponenten wurden sowohl konstruktive Anforderungen, wie hohe Modularität, Erweiterbarkeit und einfache Fertigung, als auch funktionelle Anforderungen, wie Material- und Energieeffizienz, Maximierung des Arbeitsbereiches u.ä., angelegt. Diese Anforderungen konnten auch eingehalten werden.

All dies hat es möglich gemacht, innerhalb relativ kurzer Zeit die Roboterentwicklung bis zu einem Funktionsprototyp voranzubringen, wobei heutzutage überwiegend Laborprototypen üblich sind.

Aus funktioneller Sicht ist zu erwähnen, dass die entworfenen Roboterkonstruktionen sich durch einfache aber dennoch für Lokomotionsaufgaben ausreichende Kinematiken mit optimalen Verhältnissen und größeren Arbeitsbereichen kennzeichnen. Arbeitsweise und Platzierung der Antriebseinheiten ist sehr anthropomorph. Die elektrischen Antriebe sind sehr effizient im Bezug auf Kosten, Energieverbrauch und Leistungsdichte ausgelegt. Die integrierte Sensorik erfasst alle zur Lokomotion notwendigen Informationen, wie Körperkonfiguration, Orientierung im Gravitationsfeld, mechanische Kontaktkräfte sowie stereoskopische Videoinformation.

Es konnte gezeigt werden, dass die Roboter ANTON (mehrbeinig) als auch ANTON (zweibeinig) dank dem systematischen, iterativen Entwicklungsansatz von allen Seiten optimal entwickelt worden sind. Der Entwurf des zweibeinigen Roboters orientiert sich im Großen und Ganzen an den anthropomorphen Verhältnissen und ist in der Lage Aufgaben, wie das hochdynamische Gehen, Laufen, Kniebeugen, Aufstehen usw., durchzuführen.

Kapitel 3

Entwurf und Aufbau des Steuerungssystems

Mobile Roboter als komplexe technische Systeme mit mehreren aktiven Freiheitsgraden werden meistens über ein eingebettetes System gesteuert. Die Hauptaufgaben solcher Steuerungssysteme sind die Erfassung und Konditionierung der Sensorsignale, Digitalisierung und Vorbereitung dieser Signale für die Steuerungsalgorithmen sowie Übertragung der berechneten Steuerungssignale zu den Antrieben. Besonders zu berücksichtigen ist, dass diese Operationen koordiniert und in Echtzeit durchzuführen sind.

In der Entwicklungs-, Implementierungs- und Inbetriebnahmephase eines komplexen technischen Systems wird vom Steuerungssystem die Fähigkeit zur hybriden Simulation, auch Target-in-the-Loop (TiL) Simulation genannt, sowie zur Rapid Control Prototyping (RCP) gefordert.

Dem Aufbau eines echtzeitfähigen flexiblen Steuerungssystems mit der Fähigkeit zur TiL Simulation und RCP widmet sich dieses Kapitel.

3.1 Hybride Simulationstechniken und Rapid Control Prototyping

In den vorhergehenden Kapiteln wurde die Komplexität mobiler Roboter als Regelstrecke bereits dargestellt. Das Steuerungssystem des sechsbeinigen Roboters ANTON hat den Datenstrom von 24 Lagesensoren, 24 Inkrementalgeber sowie sechs Dreikomponentenkraftsensoren und einen zweikomponenten- Neigungssensor mit der Abtastrate von mindestens 1 kHz zu bewältigen. Außerdem müssen 24 elektrische Antriebe angesteuert werden. Ähnliche Anforderungen werden auch bei dem zweibeinigen Roboter ROTTO gestellt.

Die Entwicklung eines Steuerungssystems entsprechender Komplexität beinhaltet mehrere Schritte von der Entwicklung in einer rechnergestützten Umgebung mit entsprechender Ansteuerung virtueller Regelstrecken über die hybride HiL/SiL-Simulation des Steuerungssystems bis hin zur Implementierung des Steuerungskodes in die Steuerungshardware (s. Abb. 3.1). Die Begriffe Software-in-the-Loop (SiL) und Hardware-in-

the-Loop (HiL) beziehen sich hierbei auf die zu untersuchenden Teile des Steuerungssystems, nämlich auf die Steuerungskodes und die Steuerungshardware. Der Begriff Rapid Control Prototyping beschreibt hierbei ein Verfahren, bei dem der in der Simulationsumgebung entwickelte Steuerungskode in den hardware-spezifischen Code „per Mausklick“ umgewandelt wird.

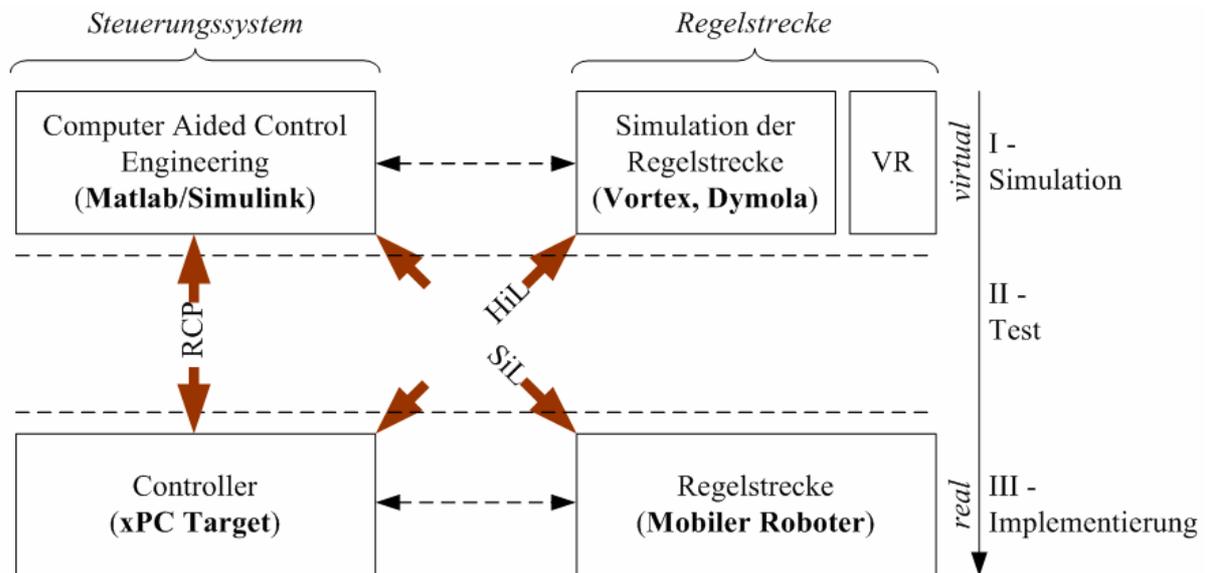


Abb. 3.1 - Entwicklungsschritte eines komplexen Steuerungssystems

Sowohl für ANTON als auch für ROTTO wurden die genannten hybriden Simulationstechniken zwecks Entwicklung des Steuerungssystems sowie der Steuerungsalgorithmen angewandt (s. Abb. 3.2 und Abb. 3.3).

Im ersten Schritt wurden die Robotermodelle in der virtuellen Umgebung anhand der CAD Daten entwickelt und abgeglichen. Diese sind domänenübergreifend und beinhalten die mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Komponenten. Für die Simulation der dynamischen Robotermodelle wurden folgende Werkzeuge eingesetzt: Modelica/Dymola, Matlab/Simulink und Vortex.

Im zweiten Schritt wurde der entsprechende Steuerungsalgorithmus entwickelt und auf dem bereits vorhandenen Robotermodell überprüft und optimiert.

Bei der Optimierung einzelner Module der Steuerungssoftware wurden SiL-Techniken verwendet. Die einzelnen Teile des Roboters wurden hierbei mittels standardisierten Schnittstellen (z.B. E/A Einsteckkarten) an die Steuerungsalgorithmen in Matlab/Simulink angekoppelt. Diese wurden in einer Serie von Tests gründlich untersucht und angepasst. Dieser Schritt diente unter anderem zur Präzisierung der Anforderungen an die Steuerungshardware.

Nach der Entwicklung und Fertigstellung der Steuerungshardware wurden die angepassten Steuerungsalgorithmen mittels RCP-Werkzeuge in die hardware-spezifische Form umgesetzt.

Die fehlerfreie Funktionsweise der Steuerungshardware wurde erstmal mit Hilfe der HiL Simulation am dem Robotermodell und anschließend am Roboter selbst nachgewiesen.

Das Entwicklungsverfahren des Steuerungssystems hat inzwischen mehrere Generationen durchlaufen. Begonnen mit einem einfachen DSP-basierten System mit RS485-Kommunikation über ein Windows PC/FPGA-basiertes System mit Ethernet-Kommunikation bis zum Echtzeit PC/FPGA-basierten System mit industrieller Echtzeit-Kommunikation (EtherCAT) hat sich das Steuerungssystem ständig weiterentwickelt und bei der Implementierung in die mobile Roboter einen hohen Grad an Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit erreicht. Nicht nur hinsichtlich der Rechen- und Kommunikationsleistung sondern auch hinsichtlich der Modularität, Handhabung und einheitlichen Struktur ist das Steuerungssystem deutlich gewachsen.

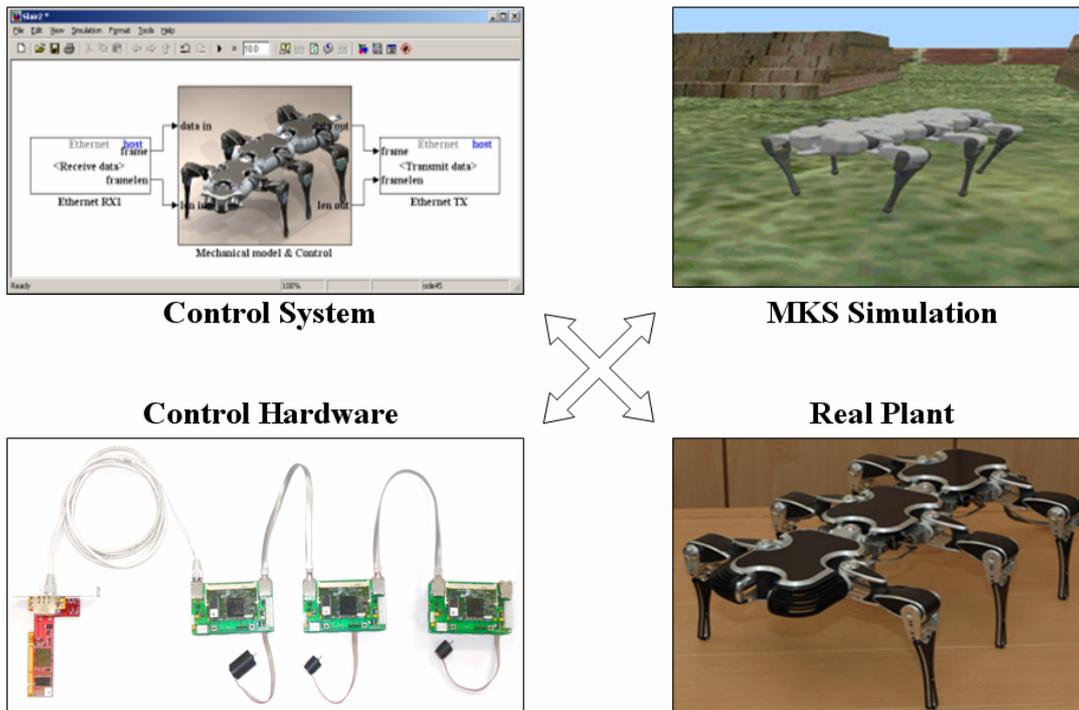
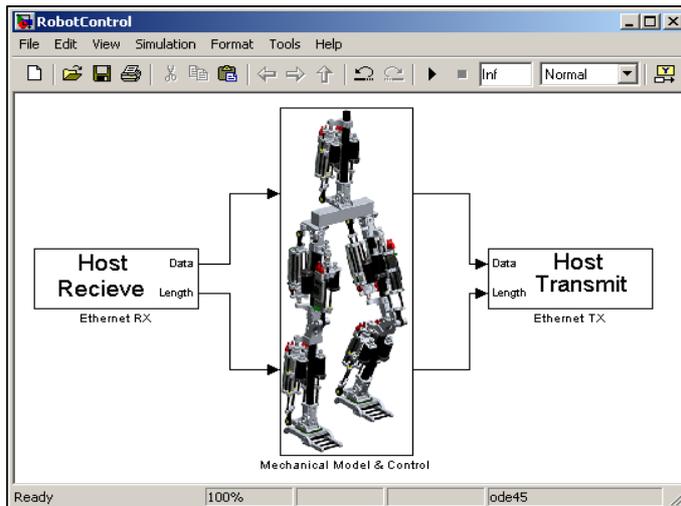


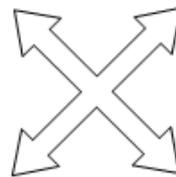
Abb. 3.2 - HiL/SiL Simulation des mobilen Roboters ANTON



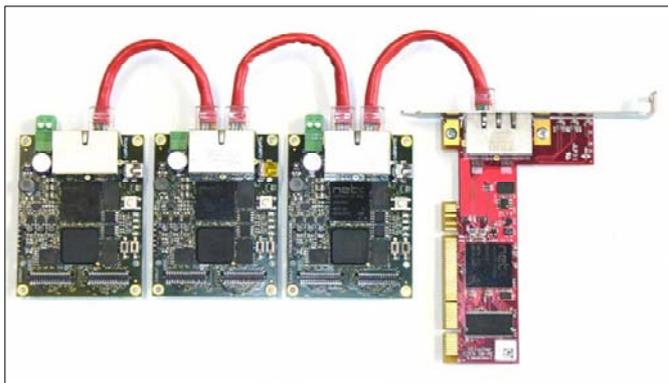
Control System



MKS Simulation



Control Hardware



Real Plant

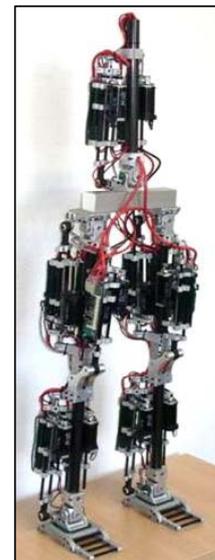


Abb. 3.3 - HiL/SiL Simulation des mobilen Roboters ROTTO

3.2 Struktur und Komponenten des Steuerungssystems

Das Ziel, eine optimale Struktur für das Steuerungssystem von sechsbeinigen und zweibeinigen mobilen Robotern zu erarbeiten, ist mit verschiedenen Schritten verbunden. Eine der wichtigsten Fragen bezieht sich auf den strukturellen Aufbau (zentral oder dezentral) der Steuerungshardware.

Die Entscheidung über einen zentralen oder dezentralen Aufbau, hängt von mehreren Faktoren ab. An erster Stelle wird oft der Grad des Determinismus gestellt. Je höher die Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit des Systems sind, desto mehr verlagern sich die

zentralen Steuerungsstrukturen hin zu dezentralen Anordnungen. Aber nicht zuletzt werden auch Faktoren wie Gesamtkosten, Einfachheit der Inbetriebnahme und Wartung betrachtet. Da es bei jedem zentralen Konzept auch dezentrale Strukturen gibt und jeder dezentrale Aufbau auch zentrale Anteile besitzt, kann keine eindeutige Grenze zwischen den zentralen und dezentralen Steuerungskonzepten gezogen werden. Die Verfügbarkeit leistungsfähiger und preiswerter Kommunikationsbausteine führt - in Verbindung mit der modernen Leistungselektronik - zu neuen Konzepten von elektrischen Antrieben für Robotersysteme. Die immer leistungsfähigere und zuverlässigere Kommunikation beeinflusst den Fortschritt von sogenannten vernetzten Antrieben, deren Vorteile sich insbesondere bei der Entwicklung mobiler Roboter verdeutlichen.

3.2.1 Übersicht relevanter Steuerungsarchitekturen

Der grundlegende Unterschied zwischen einem zentralen oder dezentralen Ansatz besteht im Umfang der Steuerungsaufgaben. Bei einem zentralen System werden an einzelnen Komponenten lediglich relativ kleine Arbeitspakete übermittelt. Bei einem dezentralen Konzept dagegen erledigen die Komponenten weit komplexere Aufträge. Mit steigender Dezentralisierung werden somit zentrale Steuerungen durch die Auslagerung von Arbeitsprozessen auf intelligente Komponenten entlastet. Dafür sind aber Kommunikationsverbindungen erforderlich, die sich von denen in einem zentral organisierten Steuerungssystem unterscheiden.

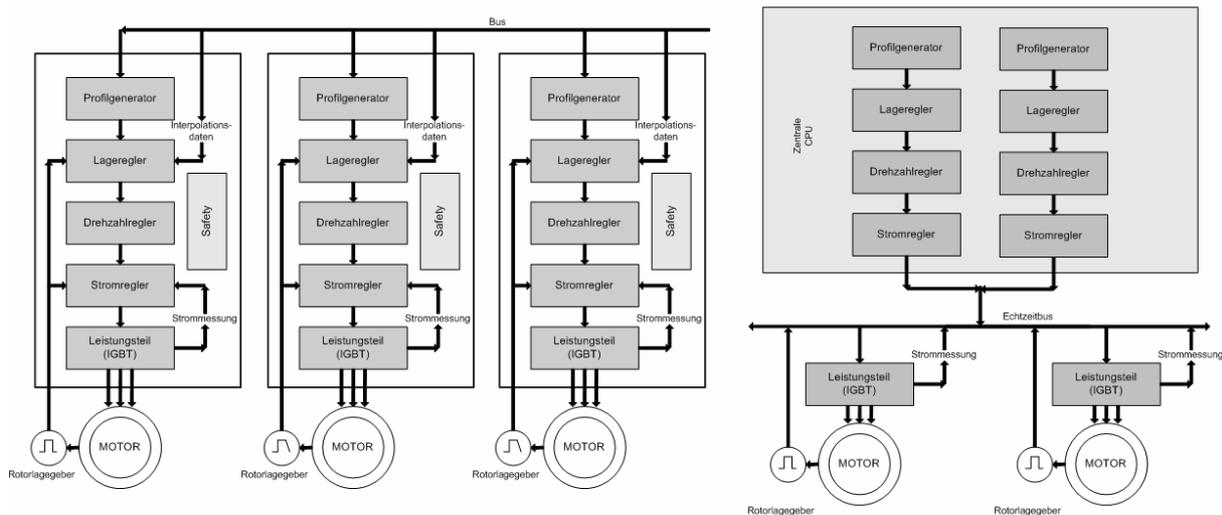


Abb. 3.4 - Merkmale der dezentralen und zentralen Steuerungsstruktur: die Regelschleife ist in der Steuerungseinheit integriert (links) bzw. die Regelschleife ist über den Bus geschlossen (rechts)

Die Entscheidung über die strukturelle Gewichtung hängt davon ab, mit welchen Netzwerkstrukturen sich die zeitlichen Anforderungen am besten erfüllen lassen und wie sich dies mit möglichst geringen Aufwand realisieren lässt.

Die Antriebssteuerung hat abhängig vom Regelungskonzept eine ganze Reihe von Aufgaben zu bewältigen: Ein Profilgenerator muss für jeden Takt die jeweilige Achsen-Beschleunigung errechnen, ein Lageregler erfasst und korrigiert die Position der Achse, ein weiterer Regler korrigiert die Drehzahl und somit die Geschwindigkeit der Bewegung, und ein Stromregler die Kraft bzw. das Drehmoment der ausgeführten Bewegung bestimmt. Wenn der Antrieb

über genügend Rechenleistung für diese Berechnungen verfügt, können sie direkt im Antrieb selbst erfolgen, andernfalls werden diese von einer zentralen Steuerung übernommen. Eine zentrale Berechnung erfordert aber eine große Bandbreite des Netzwerkes und eine enorme Rechenleistungen der Steuerung, wenn es sich um die Kontrolle mehrerer Achsen handelt.

Es ist offensichtlich, dass schon bei wenigen Achsen die zu verarbeitenden Datenmengen sehr groß werden können. Die Steuerung müsste sämtliche Berechnungen vornehmen und diese an den Antrieb senden. Der Antrieb wiederum meldet seinen aktuellen Zustand ununterbrochen über den Bus an die Steuerung zurück. So wäre die Regelschleife über das Netzwerk geschlossen. Die erforderliche Berechnungen für die Stromregelung extern zu bewältigen, ist bei typischen Arbeitsfrequenzen von mehr als 20 kHz (Taktdauer 31,25 μ s) praktisch ausgeschlossen.

Zentrale Strukturen sind nicht so flexibel wie dezentrale wenn es um Änderungen, Neuerungen oder Erweiterungen geht. Dabei muss bei allen Erweiterungen der Peripherie der Kern der Struktur selbst modifiziert werden. Die verteilte, dezentrale Steuerungstechnik kann sehr strukturiert aufgebaut werden und ermöglicht damit einen unkomplizierten Austausch und Test von einzelnen Modulen. Dabei entsteht aber ein wesentlicher Aufwand bei der Kommunikation der Module untereinander, zum Hauptrechner und zum Synchronisieren der verteilten Rechner beim Hochlauf und Stopp.

Die zentrale Steuerungstechnik bietet viele Vorteile wie ein einfacher Hochlauf und Stopp des Robotersystems, zentrale Diagnose, Inbetriebnahme und Wartung, sowie die einfache Entwicklung und Modifizierung der Steuerungsalgorithmen. Da die Lageregelung, die Kopplung und die Synchronisierung der Achsen allein durch die Software im PC berechnet werden, können die Antriebe, abgesehen von Stromregelung und Sicherheitsfunktionen, „dumm“ und damit auch einfach und kosteneffizient aufgebaut werden. Genau synchronisierte Antriebe reagieren sehr schnell. Die Leistungsfähigkeit der modernen PC-CPU und des nahezu unbegrenzt vorhandenen Speichers ermöglichen selbst komplizierte Achskopplungen. Auf einem Standard-PC können z.B. bis zu 100 lagegeregelt Achsen berechnet werden. Die immer preiswertere und gleichzeitig höhere Rechenleistung, die integrierte Schaltkreise und insbesondere PC-Plattformen in immer kleineren Formaten eröffnen heutzutage die Möglichkeit, Antriebe mit zentraler Intelligenz besonders einfach und kostengünstig zu realisieren.

Abbildung 3.5 zeigt einen Signalflussplan einer EtherCAT-basierten Motorregelung. In diesem Konzept beinhaltet der Antrieb selbst nur den Stromregelkreis und Ansteuerung der Leistungstransistoren im Umrichter. Die überlagerten Geschwindigkeiten bzw. Lageregelkreise sind über den Real-Time Ethernet Bus EtherCAT [128] geschlossen und die entsprechenden Regler werden in einer zentralen PC-Steuerung berechnet.

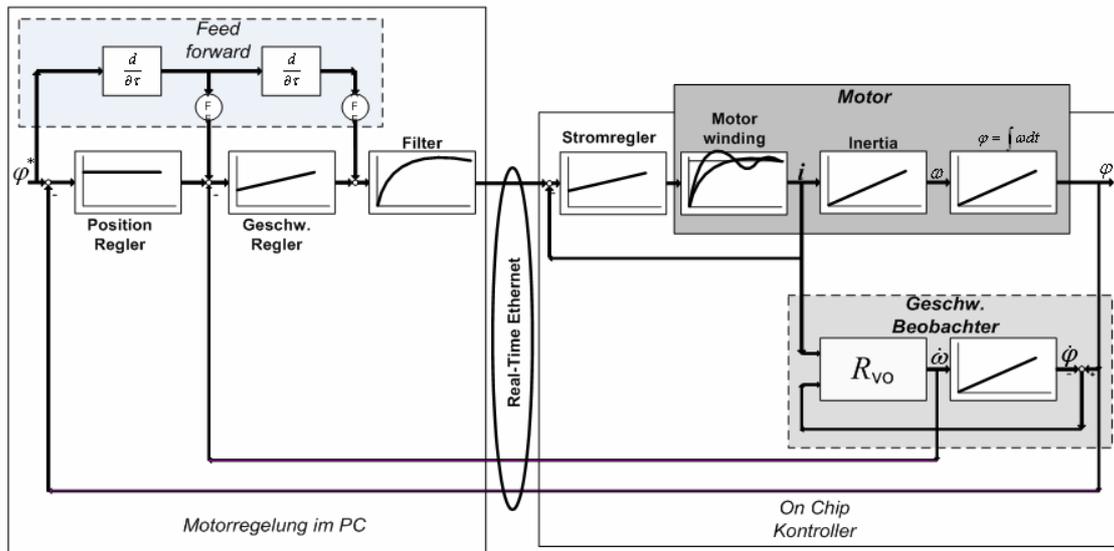


Abb. 3.5 - Konzept eines vernetzten Antriebes: der Stromregelkreis ist in den Antrieb integriert und die überlagerten Regelschleifen sind über den Bus geschlossen

Es ist ersichtlich, dass in diesem Fall der Antrieb sehr einfach und dementsprechend kosteneffizient gestaltet werden kann. Ein moderner PC ist in der Lage die Regelalgorithmen für bis zu 100 solcher Antriebe zentral zu berechnen. Eine deterministische Kommunikation mit diesen Antrieben in einem Real-Time Ethernet Bus kann eine Abtastzeit von bis zu 100 Mikrosekunden ermöglichen. Die beschriebenen Eigenschaften bieten besonders hohe Effizienz und Flexibilität bei der Steuerung von komplexen mobilen Robotern mit mehreren verteilten Freiheitsgraden.

In den Abbildungen 3.6 und 3.7 sind die erarbeiteten Konzepte zum Aufbau des Steuerungssystems für einen zwei- bzw. sechsbeinigen mobilen Roboter dargestellt. Es ist eine lineare Busstruktur in beiden Ansätzen erkennbar, was eine große Flexibilität für nachträgliche Erweiterung bietet. Außerdem kann die Topologie des Systems von einer linearen in eine baumähnliche Struktur mit Hilfe von Ethernet Switch-Modulen geändert bzw. ergänzt werden. Da der mechanische Aufbau des sechsbeinigen Roboters ANTON die Integration von bis zu 8 Antrieben innerhalb eines zentralen Körperteils aufweist, wurde in diesem Fall der intelligente dezentrale Kontroller auf netX Basis um einen zusätzlichen FPGA-Baustein erweitert.

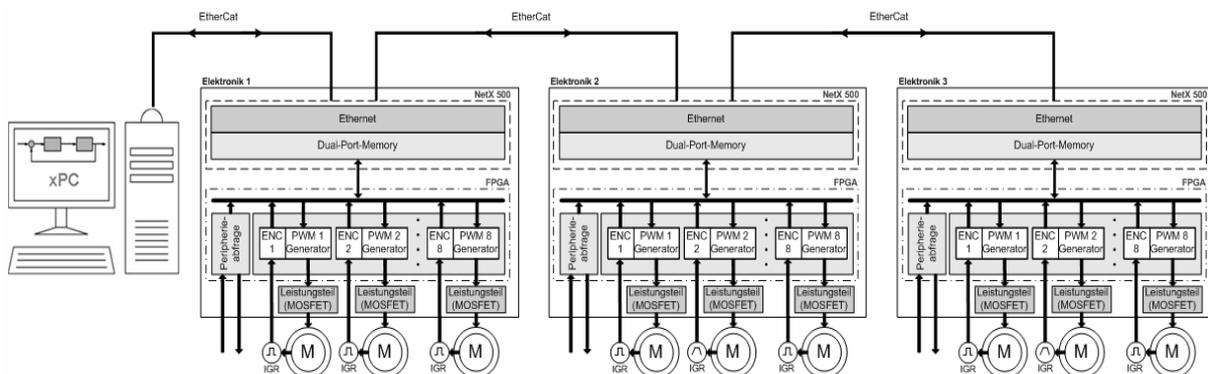


Abb. 3.6 - Vernetztes Steuer- und Antriebssystem des mobilen Roboters ANTON

Im Gegensatz dazu wird beim zweibeinigen Roboter ROTTO für die Motorregelung und Kommunikation jeweils ein eigener netX -Kontroller verwendet. Da die komplette Regelung des Motors und Kommunikation in den netX-Chip abgewickelt werden, erhalten die Antriebseinheiten wichtige neue Eigenschaften, die nachfolgend näher betrachtet werden.

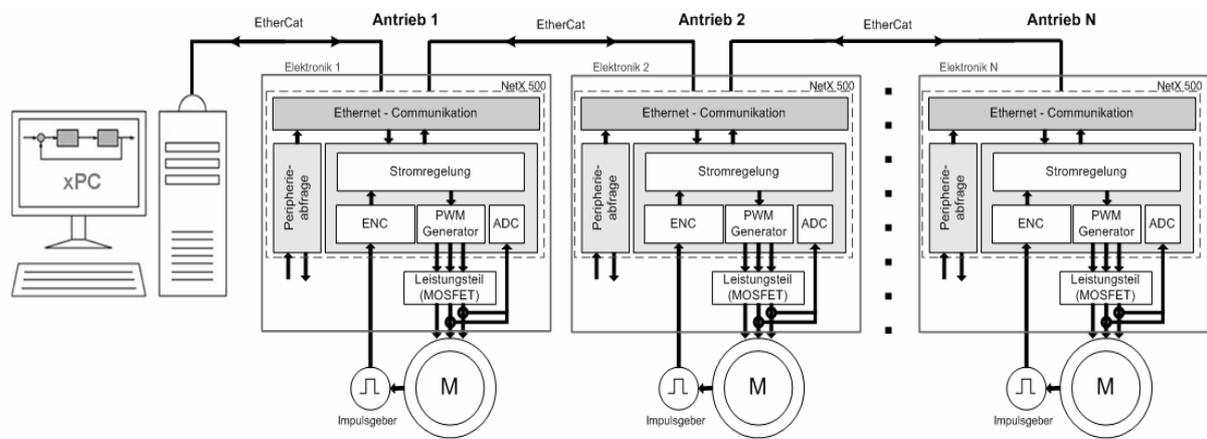


Abb. 3.7 - Vernetztes Steuer- und Antriebssystem des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO

3.2.2 Zentralrechner

Die Auswahl der geeigneten Rechnerstruktur wurde durch folgende Merkmale beeinflusst: die Verlagerung eines großen Teils des Steuerungssystems an einen zentralen Echtzeitrechner mit dem Ziel der einfachen Entwicklung und Modifikation der Algorithmen, Verwendung einer modernen Bustechnik für effiziente Vernetzung der Einzelkomponenten und die Verringerung des Verdrahtungsaufwandes und damit einhergehend die gleichzeitige Verringerung der Ausfallrate. Ein Real-Time Ethernet Bus ermöglicht dabei außerdem die Realisierung von verschiedenen Sicherheitskonzepten. Der Ausfall eines Sensors bzw. Antriebs kann z. B. eine sofortige sichere Abschaltung oder sichere Begrenzung der Geschwindigkeit bzw. des Drehmoments bewirken.

Da alle Teilnehmer an ein Netzwerk angeschlossen sind, besteht die Möglichkeit zusätzliche Rechner in Multimaster- bzw. Master/Slave-Struktur anzubinden, wenn die Rechenleistung nicht ausreichend scheint oder die Realisierung weiterer komplexer Funktionen gewünscht wird. Dabei besteht der größte Vorteil dieses Konzeptes in der genauesten Synchronisation aller Einheiten am Bus. Des Weiteren wird eine deterministische Funktion des Steuerungssystems durch die Verwendung von einem Echtzeitbetriebssystem gewährleistet. Bei der Entwicklung des Roboters wurden mehrere Varianten des Betriebssystems wie Windows/RTX, RTAI Linux, QNX Neutrino und xPC Target betrachtet. Bedingt durch seine einfache Bedienung und native Integration mit der aktuell primären Entwicklungsumgebung Matlab/Simulink aber auch durch hervorragende Echtzeiteigenschaften wurde das xPC Target von Mathworks [129] als Betriebssystem ausgewählt. Die Integration in Matlab/Simulink ermöglicht unter anderem eine schnelle Umsetzung und direkte Tests des entwickelten Steuerungssystems, was den Entwicklungs- und Inbetriebnahmeprozess enorm beschleunigt.

Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme wurde als zentraler Rechner ein moderner PC (AMD Athlon x64 3800+) gewählt. Für die Anbindung des Rechners an die Roboterhardware über einen Real-Time-Ethernet Bus wurde in Rahmen dieser Arbeit eine Master-Erweiterungskarte [130] in das xPC Target System integriert. Diese Masterkarte führt einen synchronen

Datenaustausch mit mehreren Busteilnehmern (hier Roboterantriebe und Sensoren) mit einer Busgeschwindigkeit von 100 MBit/s aus. Mit dem ausgewählten Rechner wurde die Abtastzeit des Steuerungssystems deutlich unter 1 Millisekunde getestet. Dabei erfolgt im Zentralrechner neben der Berechnung aller Komponenten des Steuerungssystems (s. Kapitel 4) auch die Berechnung der Geschwindigkeits- und Lageregelkreise für alle Antriebe im System wie es in Abbildung 3.5 dargestellt ist. Ein solches Konzept ermöglicht eine enorme Flexibilität bei der Entwicklung und Inbetriebnahme des Steuerungssystems. Auf diese Weise wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Strukturen von Antriebsreglern bis zur Generierung von Bewegungsmuster innerhalb kurzer Zeit entwickelt und erprobt.

3.2.3 Kommunikationssystem

Das Kommunikationssystem stellt ein besonderes Leistungsmerkmal des vorliegenden Konzepts dar. Angefangen mit einem einfachen und undeterministischen Bussystem basierend auf RS485 Standard in der ersten Robotergeneration (s. Katharina, SLAIR1 und SLAIR2 im Kapitel 2) ist das Kommunikationssystem für die mobilen Roboter ANTON und ROTTO zu einem schnellen und hochdeterministischen Real-Time-Ethernet-Bus gewachsen.

Die Realisierung eines Real-Time-Ethernet-Systems setzt den Einsatz von leistungsfähigen Prozessoren voraus, da die Übertragung mit einer Datenrate von 100 MBit/s und hohem Determinismus erfolgt. Aktuell kann eine solche Aufgabe lediglich von einem FPGA bzw. einem ASIC Baustein gelöst werden. Für den Aufbau des Kommunikationssystems für die mobilen Roboter ANTON und ROTTO wurde das netX System-on-Chip [130] ausgewählt.

Der netX ist ein hochintegrierter Netzwerkkontroller mit einer neuen, auf Kommunikation und maximalen Datendurchsatz optimiert, Systemarchitektur. Mit netX ist die Vision, die etablierten Feldbusse und alle Real-Time-Ethernet-Systeme mit einem Chip zu unterstützen realisiert. Der netX bietet eine bisher nicht vorstellbare Flexibilität und Funktionsumfang im Bereich der industriellen Kommunikationstechnik. Außerdem sind im netX neben umfangreichen Peripheriefunktionen (wie spezielle antriebsrelevante Bausteine) mehrere optimierte Rechenkerne mit Rechenleistung von bis zu 2600 MIPS vorhanden.

Alle existierenden Real-Time-Ethernet-Systeme benutzen die gleiche physikalische Schicht zur Datenübertragung mit 100 MBit/s und unterscheiden sich in ihren Eigenschaften lediglich im Buszugriffprotokoll. Das Kommunikationssystem für die mobilen Roboter ANTON und ROTTO wurde auf dem EtherCAT Protokoll [128] aufgebaut. Weiterhin wird die Unterstützung von SERCOS III Protokoll [131] untersucht.

Die hohe Leistungsfähigkeit der EtherCAT-Technologie ermöglicht Steuerungs- und Regelungskonzepte, die mit klassischen Bussystemen nicht realisierbar wären und erschließt die verfügbare Rechenleistung aktueller Industrie-PCs. Im Gegensatz zum Standard-Ethernet werden die Ethernet-Telegramme von den Busteilnehmern im Durchlauf bearbeitet. Das Ethernet-Telegramm wird dabei nur um wenige Bitzeiten verzögert. Maximal kann der Master 65535 Slaves adressieren. EtherCAT unterstützt Broadcast, Multicast und Slave-zu-Slave-Kommunikation. Über das EtherCAT-spezifische Verfahren der „Verteilten Uhren“ lassen sich alle Busteilnehmer mit einer Abweichung von deutlich unter 1 Mikrosekunde synchronisieren. Die Synchronisation des kompletten Systems übernimmt eine Masterkarte im Zentralrechner.

Wie bereits erwähnt, beträgt die Abtastzeit des entwickelten Systems für die mobilen Roboter ANTON und ROTTO exakt 1 Millisekunde. Des Weiteren wurde auch die Möglichkeit der

zehnfachen Verringerung der Busabtastrzeit auf 100 Mikrosekunden erfolgreich getestet, was das hohe Potenzial des Kommunikationssystems zeigt.

3.2.4 Dezentrale Controller

Die dezentralen Controller im sechsbeinigen Roboter „ANTON“ stellen eine Kombination aus einem FPGA und Netzwerkkontroller netX 50 dar (s. Abb. 3.8). Die Signale der Analogensensoren, wie Potentiometer, Kraftsensoren u.a. müssen dabei mit Hilfe von zusätzlichen ADC-Bausteinen erfasst werden. Viele moderne ADC-Bausteine stellen eine serielle Schnittstelle, wie SPI oder I2C zur Verfügung. Die Realisierung von solchen Schnittstellen erfolgt in FPGAs. Digitale Sensoren, wie z. B. Impulsgeber, werden direkt vom FPGA erfasst und verarbeitet. Außerdem übernimmt das FPGA die Erzeugung der entsprechenden Signale der Puls-Breiten-Modulation (PWM) für die Leistungsendstufen für jeden Motor. Die Regelung aller Antriebe sowie des Steuerungssystems wird komplett in einem externen Zentralrechner mit einem Echtzeitbetriebssystem realisiert. Die Regelschleifen werden dabei über das oben beschriebene Kommunikationssystem geschlossen.

In Abbildung 3.9 ist die Realisierung des Controller-Netzes für den sechsbeinigen mobilen Roboter ANTON dargestellt.

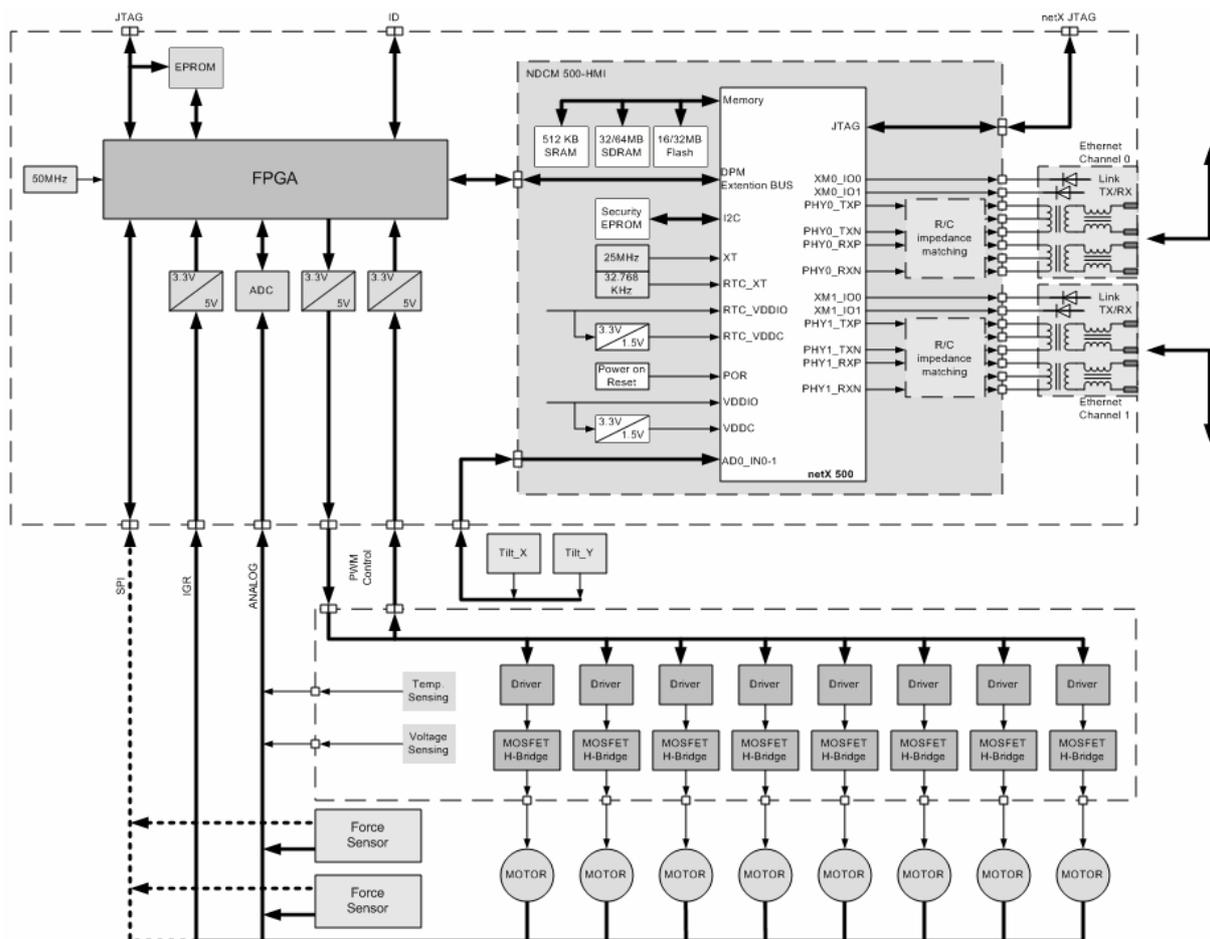


Abb. 3.8 - Aufbau des dezentralen Controllers auf netX/FPGA Basis für den sechsbeinigen mobilen Roboter ANTON

Im dezentralen Controller des sechsbeinigen Roboters ANTON wird netX lediglich als eine Bus-Kommunikationsschnittstelle verwendet. Der netX realisiert hierbei einen synchronen Datenfluss zwischen PC und FPGA unter hohen Echtzeitanforderungen. Der Datenaustausch zwischen dem netX Netzwerkkontroller und FPGA erfolgt dabei mit Hilfe eines parallelen Datenbusses.

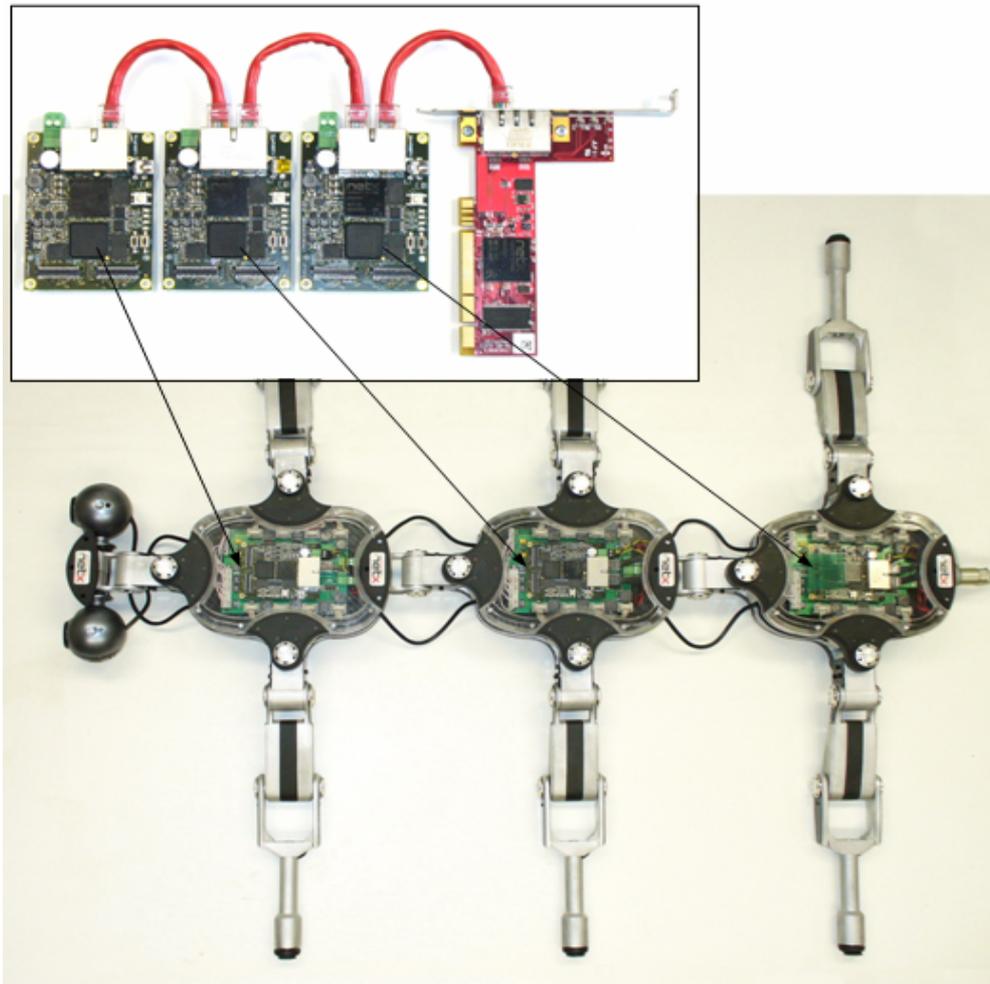


Abb. 3.9 - Realisierung des Controller-Netzes für den sechsbeinigen mobilen Roboter ANTON.

Da für die Fortbewegung des zweibeinigen Roboters bürstenlose Synchronmotoren verwendet werden, wird dem dezentralen Controller eine hohe Rechenleistung für die Regelung solcher Motoren abverlangt. Daher wurde für diese Aufgabe ein hoch integrierter Netzwerkkontroller netX 100 ausgewählt. Der Chip wickelt dabei die gesamte Ethernet Kommunikation ab und bearbeitet zusätzlich die Regelalgorithmen für die Synchronmotoren. Der prinzipielle Aufbau des dezentralen Controllers ist in Abb. 3.10 dargestellt.

Wie oben bereits beschrieben, erfolgt die komplette Abwicklung des EtherCAT Protokolls durch den im netX 100 integrierten ARM9 Prozessor und zwei xMAC/xPEC Kanäle. Die xPEC und xMAC Einheiten stellen spezielle, für maximalen Datendurchsatz optimierte Prozessoren dar. Ein dritter xMAC/xPEC Kanal wird im dezentralen Controller für Motorregelung verwendet. Dadurch steht für die Motorregelung seitens netX eine Rechenleistung von mehr als 300 MIPS zur Verfügung.

An eine xMAC Einheit im netX ist ein integrierter PWM Generator angeschlossen, der die Ansteuerung einer 3-Phasen Leistungsendstufe übernimmt. Für die Sensordatenerfassung stehen ebenfalls integrierte Inkrementalgeber und AD-Wandler Einheiten zur Verfügung. Die Datenerfassung wird mit einem PWM-Generator und Buszyklus auf weniger als 100 ns genau synchronisiert, was eine hochpräzise Motorregelung erlaubt.

Neben der Motorregelung sind im xPEC Prozessor noch zusätzliche Überwachungs- und Sicherheitsfunktionen realisiert, die Fehler im dezentralen Antrieb erkennen würden. Nach einer Fehlfunktion (z. B. einen Kommunikationsfehler, Kabelbruch oder Überlastung eines Motors) oder Durchfahren der Endschalter wird der Motor sicher abgebremst und abschaltet. Der Master erkennt diesen Fehlerzustand ebenfalls und setzt alle anderen Antriebe per Befehl außer Betrieb. Einen Wiederanlauf des Systems kann danach ausschließlich durch einen Befehl vom Master erfolgen.

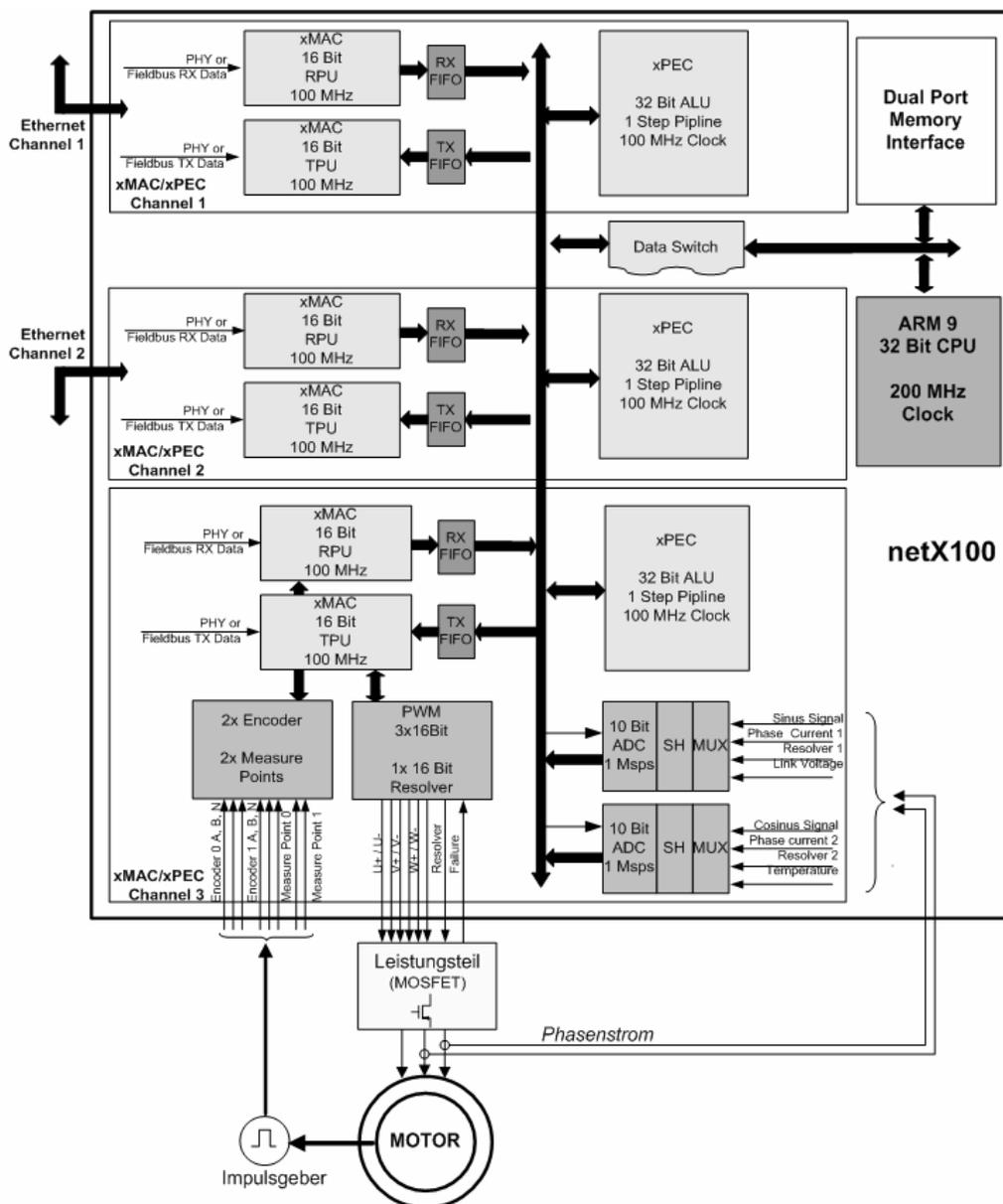


Abb. 3.10 - Aufbau des dezentralen Single-Chip Kontrollers für Antriebseinheiten des zweibeinigen Roboters ROTTO auf netX Basis

In Abbildung 3.11 ist die Realisierung des dezentralen Kontrollers für den zweibeinigen mobilen Roboter ROTTO dargestellt. Auf der Platine sind alle funktionellen Anschlüsse (2x Ethernet, 2x externe Sensoren, Inkrementalgeber) sowie Stromversorgung und Leistungs- endstufe untergebracht. Der netX Controller wird in Form eines SODIMM Moduls auf die Platine aufgesetzt.

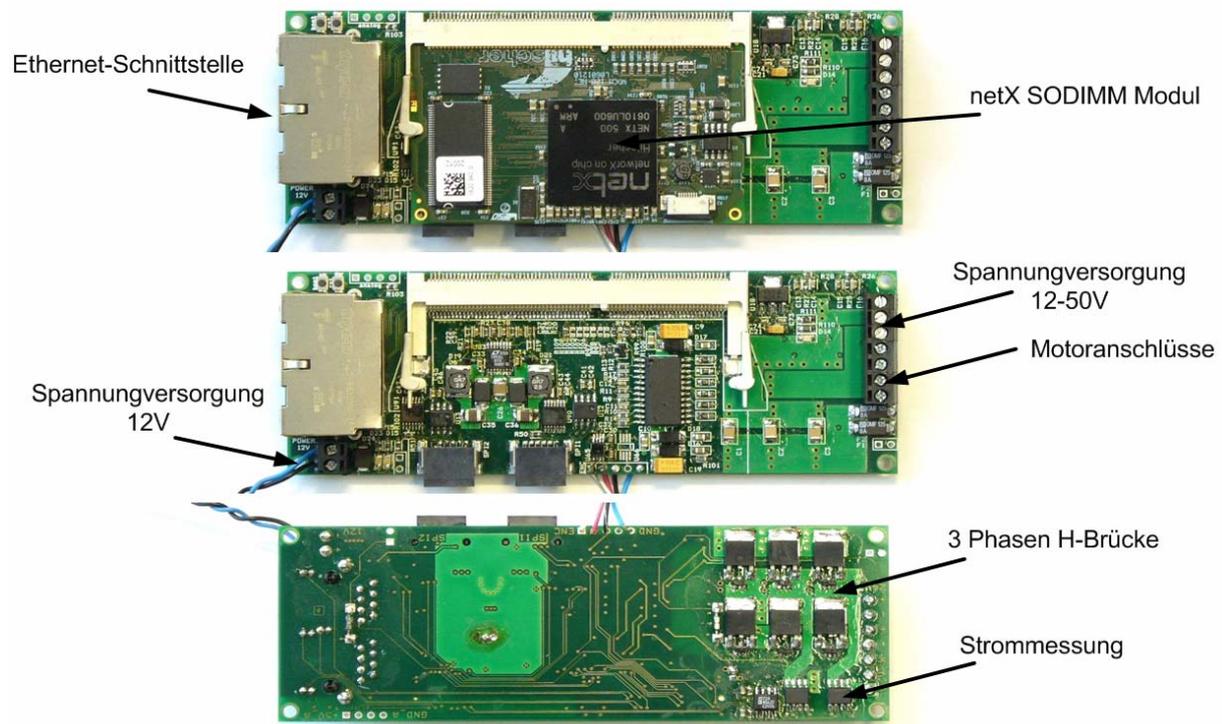


Abb. 3.11 – Dezentraler Motorkontroller für den mobilen Roboter ROTTO

3.2.5 Inbetriebnahme

Dieses Unterkapitel widmet sich der Darstellung der Inbetriebnahme einer von mechatronischen Roboterkomponenten, nämlich dem oben beschriebenen dezentralen Controller zur Ansteuerung des Robotergelenkes.

Abbildung 3.12 stellt den Testaufbau des Kniegelenkes des Roboters ROTTO dar. Entsprechend der Auslegung des Steuerungssystems (s. Abb. 3.5) wird das System auf den dezentralen Controller und den zentralen Rechner mit einem Echtzeitbetriebssystem (xPC-Target) aufgeteilt.

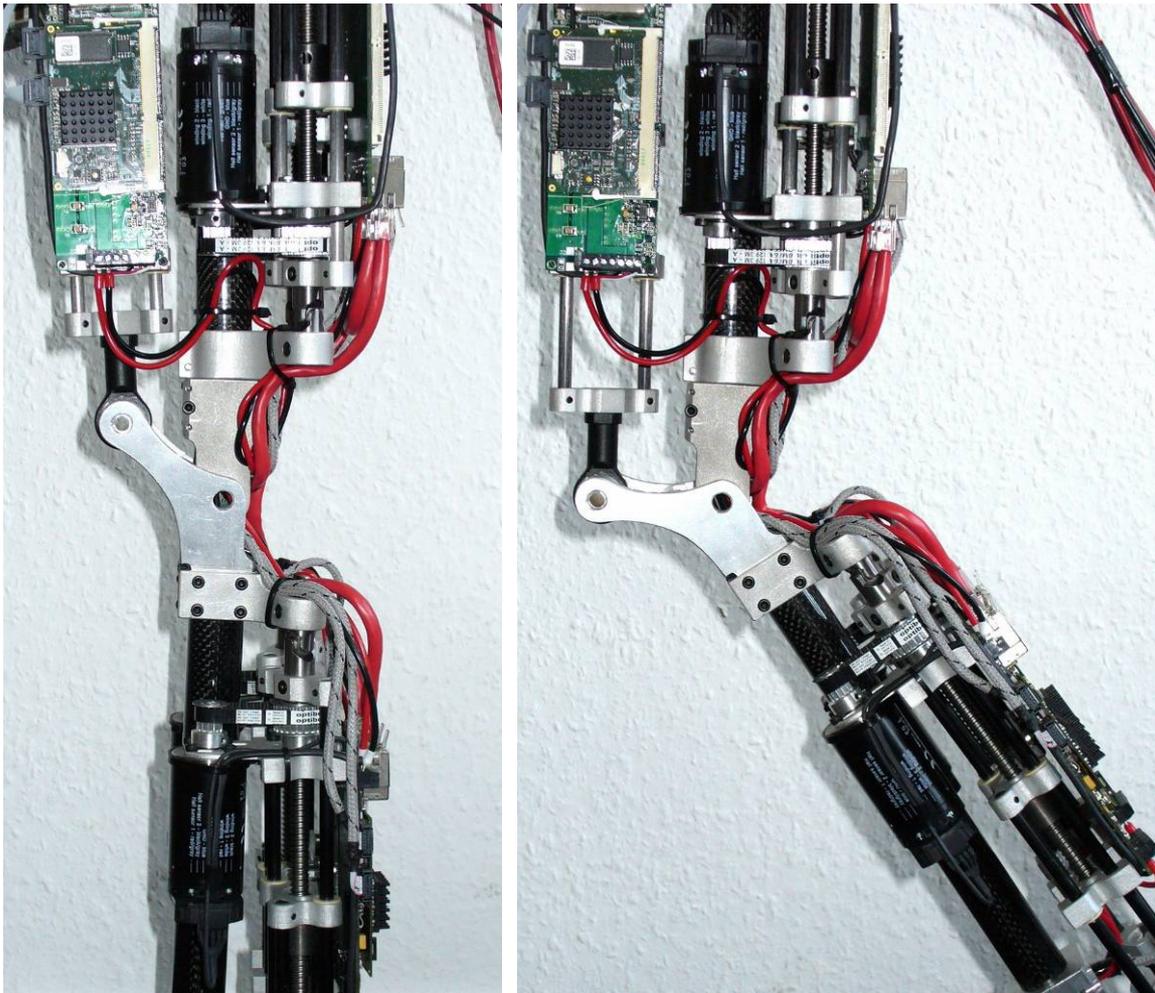


Abb. 3.12 – Testaufbau des Kniegelenkes des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO

Der Controller übernimmt die Erfassung der Motorströme, der Rotorlage und der Gelenkposition sowie die Berechnung des Stromregelkreises des PMSM Motors. Die Stromregelung wird im netX-Netzwerkcontroller berechnet und zwar synchron mit dem PWM Zyklus (28 KHz). Synchronisiert über die deterministische EtherCAT Schnittstelle werden Sensordaten und Sollwerte zwischen dem zentralen Rechner und den Sensoren/Aktuatoren ausgetauscht. Auf dem zentralen Rechner erfolgt die Berechnung der Geschwindigkeits- bzw. Positionsregelkreise (s. Abb. 3.5). Die Abtastzeit der Geschwindigkeit und Positionsregelkreise hängt von der Leistungsfähigkeit des xPC-Targets ab. Im dargestellten Aufbau wurde die Abtastzeit von 1 ms gewählt.

Die Phasenströme (i_{a_ist} , i_{b_ist}) werden durch die Abtastung des im netX integrierten AD-Wandlers gemessen und mit Hilfe der Park-Clarke Transformation von Koordinatensystem ABC ins Koordinatensystem DQ umgerechnet.

$$i_D = \frac{3}{2} \left[i_A \sin(\varphi) + i_B \sin\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + i_C \sin\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

$$i_Q = \frac{3}{2} \left[i_A \cos(\varphi) + i_B \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + i_C \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

Die Soll-Ist Abweichung der Ströme i_D und i_Q wird mit einem PI-Stromregler ausgeregelt:

$$\frac{U_{Begr}}{e_i} = P_{Reg} + I_{Reg} \cdot \frac{1}{1-z^{-1}}$$

Des Weiteren werden die Spannungen des Koordinatensystems DQ in das Koordinatensystem ABC (U_a, U_b, U_c) mit Hilfe der inversen Clarke-Park Transformation umgerechnet:

$$U_A = i_D \sin(\varphi) + i_Q \cos(\varphi)$$

$$U_B = i_D \sin\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + i_Q \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$U_C = i_D \sin\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) + i_Q \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Diese werden durch die Raumzeigermodulation (U_u, U_v, U_w) in die Umschaltpunkte der Leistungstransistoren transformiert.

Parallel zur Berechnung der Stromregelung werden in der netX CPU die Kommunikationsaufgaben abgearbeitet und zum xPC-Target übertragen.

Der Geschwindigkeitsregelkreis und Positionsregelkreis für den Aufbau werden im Matlab/Simulink entworfen und mit Hilfe eines Real-Time-Workshop-Tools [129] in den zentralen Steuerungsrechner xPC übertragen.

In Abbildung 3.13 ist ein Matlab Model zur Lageregelung eines PMSM Motors dargestellt.

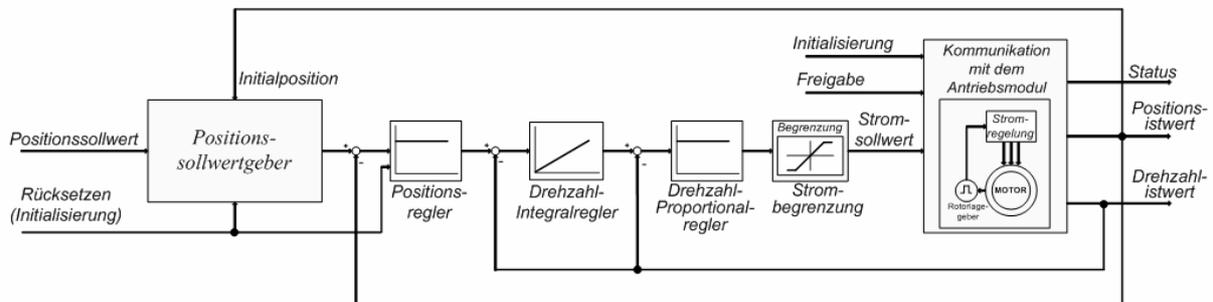


Abb. 3.13 – Lageregelung eines PMSM Motors

Für die richtige Funktion des PMSM Motor ist die Kenntnis der Rotorlage besonders wichtig. Deswegen wurde für die Erfassung der Rotorlage eine spezielle Referenzsequenz entwickelt. Diese Sequenz besteht aus drei Schritten:

1. Sollwert für $i_{d_soll} = 5 \text{ A}$; $i_{q_soll} = 0 \text{ A}$ für die Positionierung des Rotor entlang Flussachse D setzen;
2. eine Sekunde Pause für eine sichere Positionierung des Rotors;
3. den Positionswertzähler im Encoder-Modul zurücksetzen;
4. die Stromregelkreise frei schalten und auf ankommendes Ethernet-Telegramm mit Stromsollwert I_{q_soll} warten. Flussbildende Komponente I_{d_soll} auf Null setzen.

Das Lageregelungssystem ist als Kaskadenregelung aufgebaut. Der innen liegende Stromregelkreis I_q ist direkt im netX realisiert. Die Geschwindigkeit- und Lageregelkreise werden über Ethernet geschlossen und in der externen PC-Steuerung berechnet. Es wurde ein IP-Regler für den Geschwindigkeitsregelkreis und den P-Regler für Positionregelkreis realisiert.

Um die korrekte Funktion der Regler zu gewährleisten wurde ein nichtlinearer Positionssollwertgeber (s. Abb. 3.14).

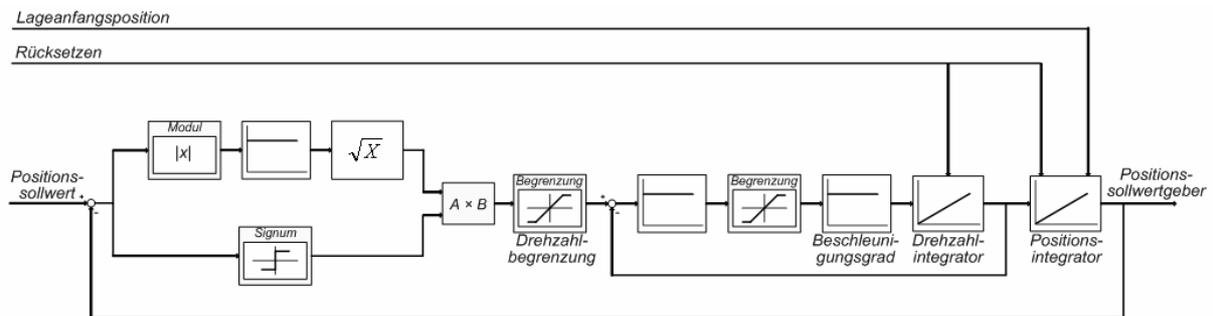


Abb. 3.14 – Nichtlinearer Positionssollwertgeber

In Abbildung 3.15 sind die Zeitverläufe relevanter Motorgrößen in einem Regelungssystem mit nichtlinearem Sollwertrechner dargestellt.

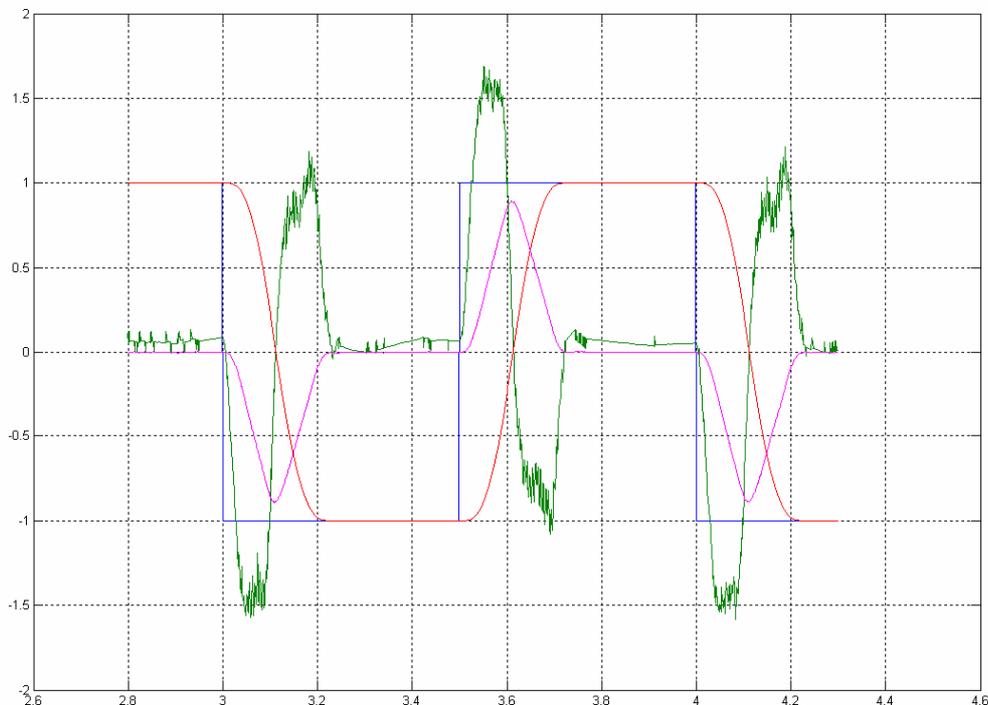


Abb. 3.15 – Zeitverlauf von Strom (grün), Geschwindigkeit (rosa) und Position (rot) bei Sollwertvorgabe für Position (blau) von ± 10 Motorumdrehung ohne Motorlast; Strom und Geschwindigkeit sind in Bezug auf Nominalwerte (3,6 A und 13000 U/min) dargestellt; Position zehnfach verringert

Die Berechnung des gesamten Algorithmus inklusive zweier kompletter PI Stromregler, Filterung, Begrenzung, Umrechnung von ABC in DQ Koordinatensysteme und zurück, sowie der Raumzeigermodulation findet innerhalb von zehn Mikrosekunden im xPEC des netX statt.

3.3 Zusammenfassung

Im ersten Teil des vorliegenden Kapitels wurden die Techniken zur Entwicklung des Steuerungssystems, bestehend aus der Steuerungshardware und Steuerungsalgorithmen, dargestellt sowie die Entwicklungsevolution der Steuerungshardware bei den vorläufigen Roboterkonstruktionen von einfachem DSP-basierten System mit RS485-Kommunikation über ein WindowsPC/FPGA-basiertes System mit Ethernet-Kommunikation bis zum EchtzeitPC/FPGA-basiertes System mit industrieller Echtzeit-Kommunikation (EtherCAT) dargelegt.

Danach wurde die Frage zum zentralen oder dezentralen Aufbau des Steuerungssystems ausführlich diskutiert und dabei alle gängigen Schemata von sogenannten vernetzten Antrieben dargestellt. Anschließend wurden die Steuerungssysteme der mobilen Roboter ANTON und ROTTO eingeführt und ihre Komponenten (Zentralrechner, Kommunikation und dezentrale Controller) in Einzelheiten repräsentiert.

Die zum Schluss dargestellte Inbetriebnahme des Steuerungssystems und dessen quantitative Untersuchungen insbesondere für die Steuerung/Regelung von dreiphasigen Elektromotoren schließen inhaltlich das Kapitel und beweisen die hohe Güte des gesamten Steuerungssystems sowie dessen einzelnen Komponenten.

Zu den wichtigsten Eigenschaften des entwickelten Konzepts zum Aufbau des Steuerungssystems gehören die hohe Flexibilität und Erweiterbarkeit des verwendeten, leistungsfähigen Kommunikationssystems. Die Verwendung des gewählten Kommunikationssystems ermöglicht die schnelle Realisierung neuer Regelungskonzepte, wobei alle Teile des Steuerungs- bzw. Regelungssystems auf den Zentralrechner verlagert sind und die Regelungsschleifen über den Bus geschlossen werden. Das resultiert wiederum in einem exzellenten Synchronismus der Antriebe und demonstriert die Flexibilität des gewählten Ansatzes.

Kapitel 4

Generierung der Raumbewegungen für mobile Roboter

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist eine Vielzahl von Konzepten zum Aufbau eines Steuerungssystems für mobile Roboter untersucht worden mit dem Ziel eine allgemeine Struktur bzw. Gesetzmäßigkeiten einer solchen Struktur zu definieren. Bei diesem Ansatz wurde auch die Organisation des biomechanischen Steuerungssystems von Menschen und Tieren mitbetrachtet.

Die Analyse von Steuerungskonzepten bestehender mobiler Roboter hat gezeigt, dass eine breite Palette technischer Lösungen von einer vollkommenen analytischen Beschreibung über reaktive-regelbasierte Methoden bis hin zu wissensbasierten bzw. selbstlernenden Verfahren, zum Einsatz kommt.

Die Analyse von Steuerungssystemen des biomechanischen Bewegungsapparates [135] hat gezeigt, dass diese nach folgenden Regeln aufgebaut sind:

1. Das Steuerungssystem besteht aus mehreren logisch getrennten Schichten.
2. Es existiert ein zentrales Bewegungsprogramm (Generator), das mit Hilfe des unterlagerten motorischen und sensorischen Mechanismen realisiert wird.
3. Es existiert eine "vertikale" Wechselwirkung zwischen den einzelnen Schichten (von einer höheren Steuerungsschicht auf eine untere Schicht und umgekehrt) sowie gleichermaßen eine „horizontale“ Wechselwirkung innerhalb einer Schicht.
4. Es gibt verschiedene Arten von Wechselwirkungen zwischen den Schichten, wie:
 - von einer höheren Schicht kommt ein Steuersignal mit der Aufgabe, die Wechselwirkung zwischen den Elementen unteren Schichten zu verändern;
 - Steuerung der gesamten Funktionen der unteren Schichten;
 - direkte Steuerung untergliederter Elemente "from the top" .
5. Jede Steuerungsschicht ist innerhalb bestimmter Grenzen autonom und kann „unabhängig agieren“.
6. Jede Bewegungsaufgabe wird in der Regel in einer möglichst niedrigen Schicht des Steuerungssystems ausgeführt und die oberen Schichten des Steuerungssystems werden nach Möglichkeit von „unwichtigen“ Aufgaben entlastet.
7. Die Bewegungsaufgaben der unteren Schichten werden erst dann ausgeführt, wenn diese nicht den Befehlen der höher liegenden Schichten widersprechen.

All dies lässt sich dergestalt zusammenfassen, dass die wichtigsten Aufbauprinzipien eines Systems zur Steuerung des Bewegungsapparates technischer sowie biologischer Herkunft auf HIERARCHIE und MODULARITÄT beruhen.

Dementsprechend sind auch die Systeme zur Bewegungssteuerung der Roboter ANTON und ROTTO mehrschichtig, hierarchisch und modular aufgebaut. Die drei unteren Schichten sind in Abbildung 4.1 dargestellt und werden als Action Level, Primitive Level und Servo Level (von oben nach unten) bezeichnet. Diese Struktur entspricht dem Aufbau des Steuerungssystems des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO. Die entsprechende Struktur des sechsbeinigen mobilen Roboters ANTON kann [114] entnommen werden.

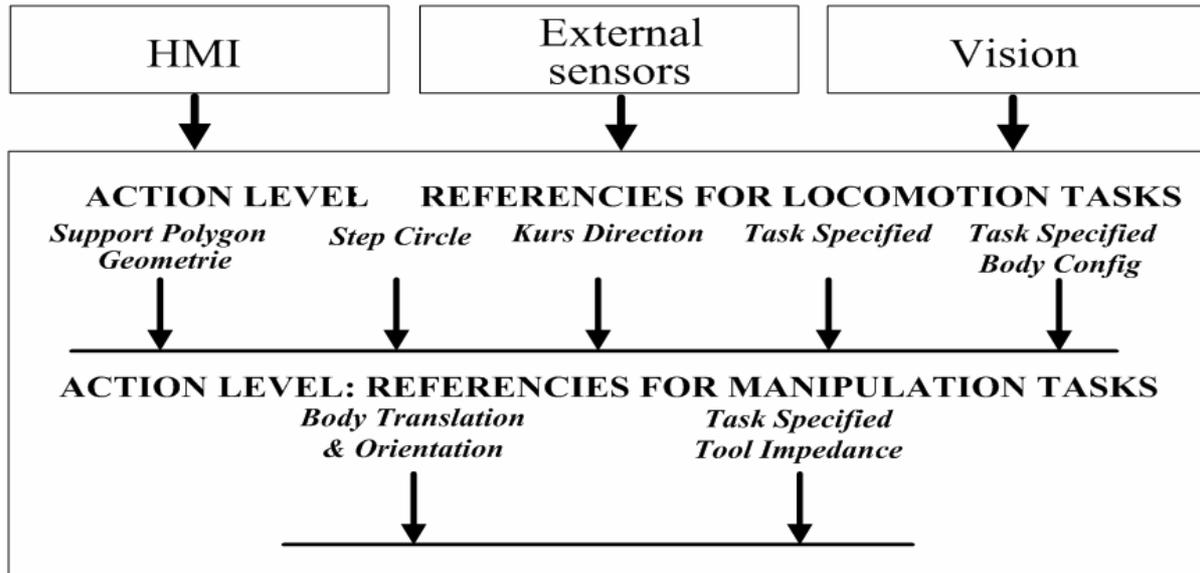


Abb. 4.1a – Hierarchisches, modulares Steuerungssystem: Action Level

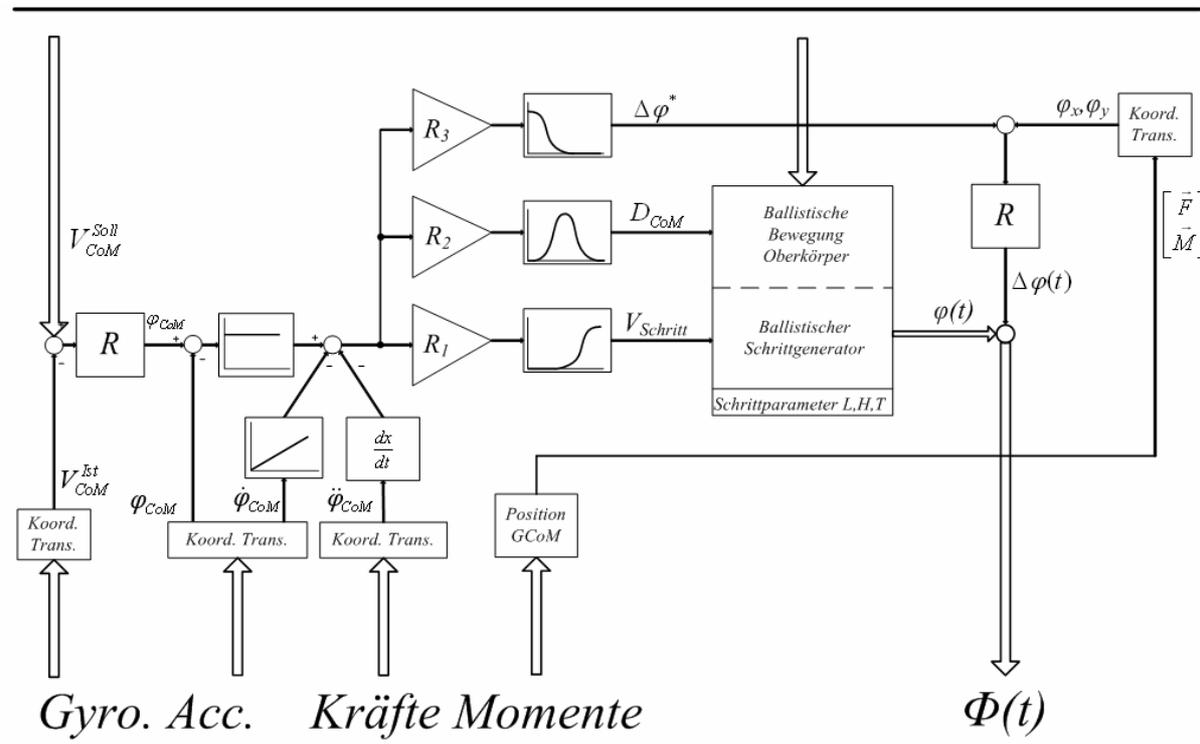


Abb. 4.1b – Hierarchisches, modulares Steuerungssystem: Primitive Level

SERVO LEVEL: TRAJECTORIES CONTROL & MONITORING

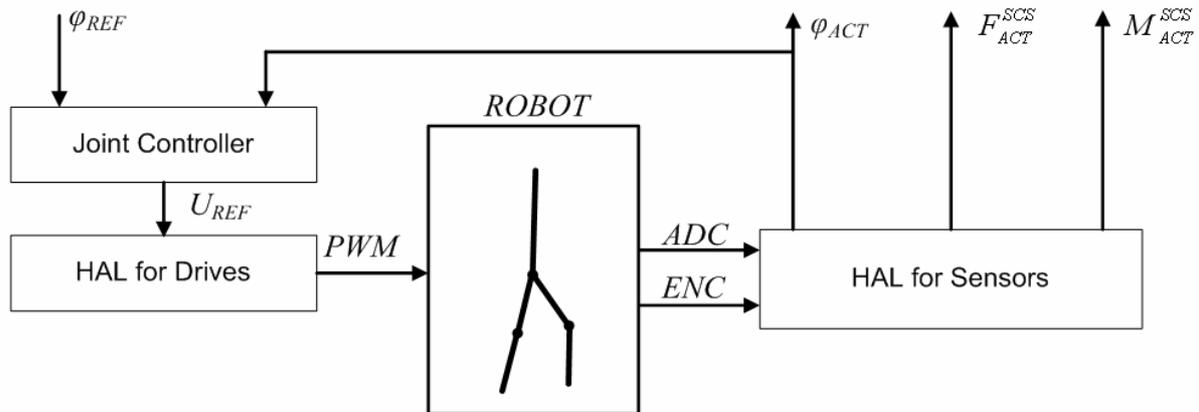


Abb. 4.1c - Hierarchisches, modulares Steuerungssystem: Servo Level

Action Level stellt die Operator- und Überwachungsebene dar. Diese basiert auf dem Konzept der Synergie des quasi-regulären Ganges, der die allgemeinen Bewegungsmuster bildet. Diese Schicht definiert globale Bewegungsparameter wie lineare und Winkelkomponenten der Körpergeschwindigkeiten, Gangmuster usw.

Primitive Level transformiert die Befehle der oberen Schicht in die entsprechenden Gelenktrajektorien. Diese Schicht besitzt einen hohen Grad von Autonomie und besteht aus einer Reihe von Modulen zur Generierung der Grundbewegungen: Modul zur Generierung der Gangart (zeitliche Gestaltung des Ganges), Schrittzklusgenerator (räumliche Gestaltung des Ganges), Modul zur Modifizierung der Schrittzklen, Modul zur Stabilisierung des Robotermassenmittelpunktes während des Ganges, Modul zur Koordinatenumrechnung, Modul zur Sensorsignalverarbeitung usw.

Servo Level stellt eine intelligente Aktor-/Sensorebene dar. Auf dieser Ebene wird die Abstraktion der oberen Ebenen von verwendeten sensorischen und motorischen Komponenten unternommen sowie einzelne Gelenkregler untergebracht. Das gewährleistet die notwendige Unabhängigkeit von verwendeten Hardwarekomponenten und die Modularisierung der motorischen und sensorischen Funktionen in einem mobilen Roboter.

Das vorgeschlagene Blockscheema erlaubt eine relativ einfache Modularisierung und damit auch die Programmierung der einzelnen Komponenten. Es gewährleistet außerdem eine gewisse Autonomie und ermöglicht damit eine weitgehend rückwirkungsfreie Modifizierung einzelner Algorithmen des Gesamtsystems.

Die vorliegende Arbeit widmet sich in erster Linie der Methoden zur zeitlichen und räumlichen Gestaltung des Ganges eines mobilen Roboters sowie der Stabilisierung seines Massenmittelpunktes während des Ganges.

Die erste Bewegungsaufgabe ist sowohl für einen zweibeinigen als auch für einen mehrbeinigen Roboter von gleichem Interesse und beruht auf der Notwendigkeit die Gangart und den Schrittzklus zu gestalten. Diese „ballistisch“ genannte Methode hat sich als allgemeine Methode zur Generierung energieoptimaler Roboterbewegungen in der Zeit- und Raumskala bewiesen und wird in den folgenden Abschnitten detailliert dargestellt.

Die Stabilisierung des Massenmittelpunktes des Roboters während der räumlichen Bewegung ist kein Selbstzweck sondern eine notwendige Bedingung zum Beibehalten der Roboterbewegung. Für mehrbeinige und einige vierbeinige Roboter äußert sich diese Aufgabe in der Beibehaltung der statischen Stabilität, d.h. in der Stabilisierung des Roboter Massenmittelpunktes innerhalb des Stützpolygons. Allerdings ist für zweibeinige und einige vierbeinige Roboter diese Bedingung für den größten Teil des Schrittzylusses nicht erfüllt. Hierbei spricht man über die Aufgabe des Beibehaltens der dynamischen Stabilität. Als eine der wichtigsten Bewegungsaufgaben wird die dynamische Stabilisierung des zweibeinigen Roboters in den folgenden Abschnitten ausführlich diskutiert und die ausgewählten Methoden werden detailliert dargestellt.

4.1 Modellbildung und Simulation mobiler Roboter

Bei der simulativen Untersuchung verschiedener Steuerungs- bzw. Regelungskonzepte werden entsprechend detaillierte Robotermodelle gebraucht. Diese Modelle enthalten je nach Komplexität kinematische Zusammenhänge oder auch dynamische Bewegungsgleichungen. Weiter werden die grundlegende Methoden der Modellbildung aufgeführt und am Beispiel des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO erläutert.

4.1.1 Kinematische Zusammenhänge

Die Gelenke des zweibeinigen Roboters ROTTO werden mit Hilfe von linearen Antrieben bewegt. So wird das Kniegelenk des Roboters durch einen versetzten Antrieb und speziell ausgelegte Hebel angesteuert. Die Verstellung des Kniegelenks um einen bestimmten Winkel erfolgt dabei durch eine gezielte Änderung der Länge des Linearantriebs. Mit Hilfe von direkter kinematischer Transformation (Vorwärtstransformation) kann aus der bekannten Länge des Linearantriebs der Gelenkwinkel ermittelt werden. Umgekehrt wird aus dem bekannten Gelenkwinkel die entsprechende Länge des Linearantriebes mit Hilfe einer inversen kinematischer Transformation (Rückwärtstransformation) errechnet. Abhängig von der Anordnung der Gelenke und der Antriebe können kinematischen Transformationen relativ komplex sein. Eine parallelkinematische Struktur erfordert generell eine wesentlich aufwendigere Transformation. Dagegen wurde die Gelenkstruktur des zweibeinigen Roboters ROTTO so gestaltet, dass die eindeutige unkomplizierte direkte/inverse Transformation zwischen den Längen der Linearantriebe und den Gelenkwinkeln möglich ist. Im Folgenden ist die Ableitung der entsprechenden kinematischen Zusammenhänge für die Gelenke des zweibeinigen Roboters ROTTO detailliert dargelegt.

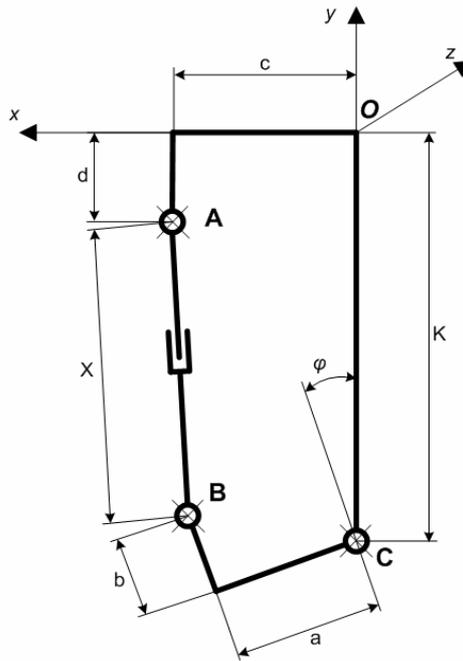


Abb. 4.2 – Kinematisches Modell des Kniegelenks des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO

Kinematik des Kniegelenks

Abbildung 4.2 zeigt das kinematische Modell des Kniegelenks des Roboters ROTTO. Die inverse Kinematik (Rückwärtstransformation) besteht in der Ermittlung der Länge X anhand des bekannten Gelenkwinkels φ .

Die Länge X stellt einen Abstand zwischen den Punkten A und B dar und wird durch die räumlichen Koordinaten dieser Punkte bestimmt:

$$A = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad X = \sqrt{(B_x - A_x)^2 + (B_y - A_y)^2}$$

Die entsprechenden Koordinaten der Punkte A und B werden mit Hilfe folgender Transformationen ermittelt:

Ein Bezugskordinatensystem wird im Punkt O ausgewählt. Für die Koordinaten des Punkts O gilt:

$$O = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Die Transformation vom Punkt O zum Punkt A kann mit folgender Matrix beschrieben werden:

$$T_A^O = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & c \\ 0 & 1 & 0 & -d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Für den Punkt A gilt:

$$A = T_A^O \cdot O$$

Die Transformation vom Punkt O zum Punkt C wird mit folgender Matrix beschrieben:

$$T_C^O = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -K \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Die Rotation auf den Winkel φ um die Achse Z im Punkt C wird durch eine Rotationsmatrix definiert:

$$R_\varphi^C = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Die Translation vom Punkt C zum Punkt B:

$$T_B^C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Die Koordinaten des Punktes B können daraus auf folgende Weise ermittelt werden:

$$B = T_C^O \cdot R_\alpha^C \cdot T_B^C \cdot O$$

Kinematik des Sprung-, Hüft- und Körpergelenks

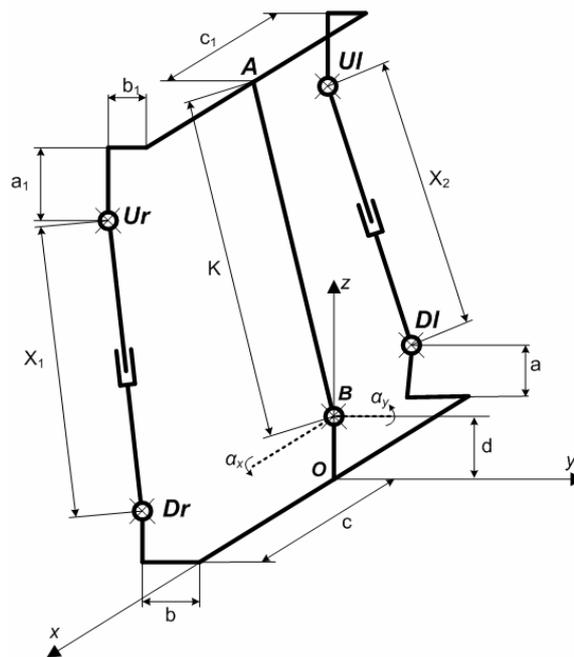


Abb. 4.3 – Kinematisches Modell für das Sprung-, Hüft- und Körpergelenk des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO

Abbildung 4.3 zeigt das kinematische Modell des Gelenks mit zwei Freiheitsgraden des zweibeinigen Roboters ROTTO. Die inverse Kinematik (Rückwärtstransformation) besteht in der Ermittlung der Längen X_1 und X_2 anhand der bekannten Gelenkwinkel α_x und α_y .

Die Längen X_1 und X_2 werden ähnlich durch den Abstand zwischen den entsprechenden Punkten D_r , U_r und D_l , U_l und deren räumlichen Koordinaten bestimmt:

$$D_r = \begin{bmatrix} D_{r_x} \\ D_{r_y} \\ D_{r_z} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad U_r = \begin{bmatrix} U_{r_x} \\ U_{r_y} \\ U_{r_z} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad D_l = \begin{bmatrix} D_{l_x} \\ D_{l_y} \\ D_{l_z} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad U_l = \begin{bmatrix} U_{l_x} \\ U_{l_y} \\ U_{l_z} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$X_1 = \sqrt{(U_{r_x} - D_{r_x})^2 + (U_{r_y} - D_{r_y})^2}, \quad X_2 = \sqrt{(U_{l_x} - D_{l_x})^2 + (U_{l_y} - D_{l_y})^2}$$

Die entsprechenden Koordinaten der Punkte D_r , U_r und D_l , U_l werden mit Hilfe darauffolgender Transformationen ermittelt.

Ein Bezugskordinatensystem wird im Punkt O ausgewählt. Für die Koordinaten des Punkts O gilt (4.1).

Die translatorischen Transformationen für die einzelnen Punkte ($O \rightarrow D_r$ und $O \rightarrow D_l$) werden auf folgende Weise ermittelt:

$$T_{Dr}^O = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & c \\ 0 & 1 & 0 & -b \\ 0 & 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T_{Dl}^O = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c \\ 0 & 1 & 0 & -b \\ 0 & 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T_B^O = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Für die Koordinaten der Punkte D_r , und D_l gilt:

$$Dr = T_{Dr}^O \cdot O; Dl = T_{Dl}^O \cdot O$$

Die entsprechenden Rotationen auf den Winkel α_x bzw. α_y um die Achse X bzw. um die Achse Y im Punkt B werden durch folgende Rotationsmatrizen definiert:

$$R_{\alpha_x}^B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_x) & -\sin(\alpha_x) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_x) & \cos(\alpha_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; R_{\alpha_y}^{\alpha x} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_y) & 0 & \sin(\alpha_y) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha_y) & 0 & \cos(\alpha_y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Die translatorischen Transformationen für die einzelnen Punkte ($B \rightarrow A$, $A \rightarrow U_r$ und $A \rightarrow U_l$) werden auf folgende Weise ermittelt:

$$T_A^{\alpha y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & K \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T_{Ur}^A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & c_1 \\ 0 & 1 & 0 & -b_1 \\ 0 & 0 & 1 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T_{Ul}^A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_1 \\ 0 & 1 & 0 & -b_1 \\ 0 & 0 & 1 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Mit Hilfe der dargestellten Transformationen werden die Koordinaten der Punkte U_r und U_l ermittelt:

$$Ur = T_B^O \cdot R_{\alpha_x}^B \cdot R_{\alpha_y}^{\alpha x} \cdot T_A^{\alpha y} \cdot T_{Ur}^A \cdot O$$

$$Ul = T_B^O \cdot R_{\alpha_x}^B \cdot R_{\alpha_y}^{\alpha x} \cdot T_A^{\alpha y} \cdot T_{Ul}^A \cdot O$$

Die aufgeführten Berechnungen stellen die inverse kinematische Transformation für die entsprechenden Gelenke dar. Die Berechnung der direkten kinematischen Transformation kann auf gleicher Weise erfolgen und wird hier weggelassen. Die kinematischen Transformationen für den sechsbeinigen Roboter ANTON entsprechen den Transformationen des sechsbeinigen Roboters KATHARINA und können [132] entnommen werden.

4.1.2 Bewegungsgleichungen nach Newton-Euler

Unter Bewegungsgleichungen werden die zusammengestellten Differentialgleichungen zweiter Ordnung der generalisierten Koordinaten des mechanischen Systems verstanden. Diese sind ein wichtiger Bestandteil bei den Analysen der dynamischen Eigenschaften des Robotersystems.

Der Newton–Euler Algorithmus ist eine der Methoden zur Ableitung der Bewegungsgleichungen der mechanischen Systeme [133, 134], auch der anthropomorphen Mechanismen. Er beruht auf den mechanischen Gleichungen, die das Verhalten der Glieder beschreiben, die miteinander in einem kinematischen Paar verkoppelt sind. Die Bewegungsmodelle der anthropomorphen Mechanismen bestehen in der Regel aus kinematischen Paaren mit rotatorischer relativer Bewegung der Glieder. Ein solches Paar ist in Abb. 4.4 dargestellt.

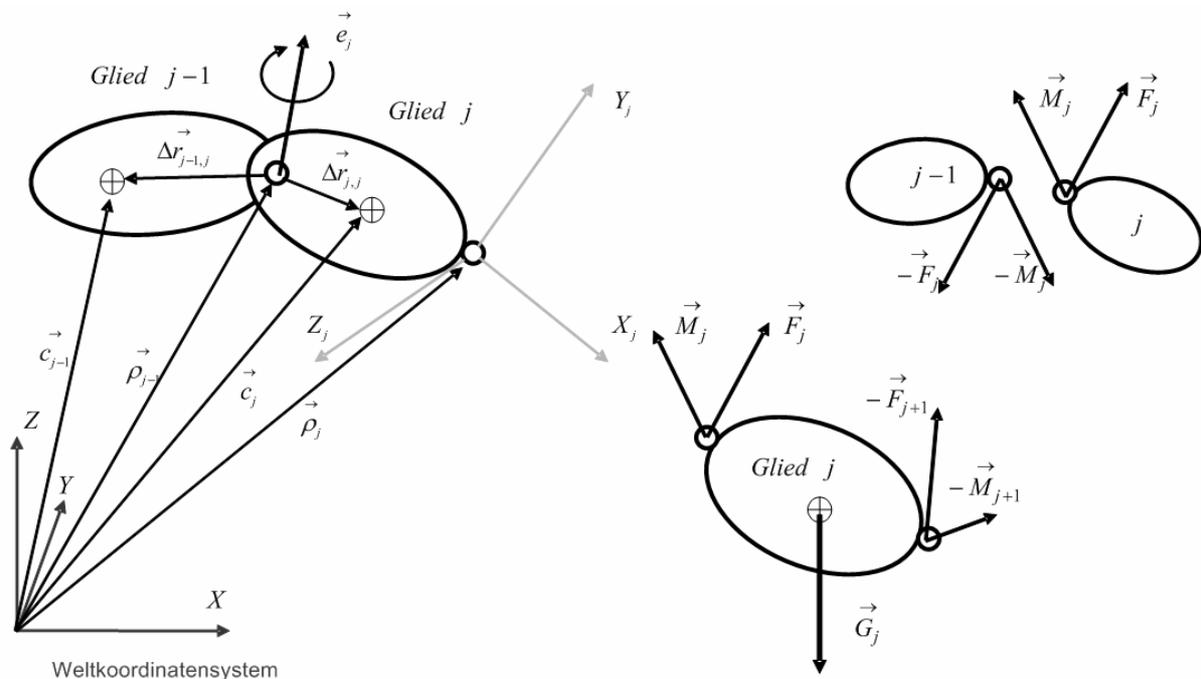


Abb. 4.4 - Eindimensionales kinematisches Paar der V – Klasse (oben) und in diesem Paar entstehende Kräfte

Hier wird angenommen, dass die Glieder $j - 1$ und j der Bestandteil einer kinematischen Kette sind. Die Drehachse des Paares ist von dem Basisvektor \vec{e}_j gekennzeichnet. Die Vektoren $\vec{\Delta r}_{j-1,j}$ und $\vec{\Delta r}_{j,j}$ definieren die Lage der Massenmittelpunkte der benachbarten Glieder. Aus solchen Paaren können auch wesentlich komplexere Paare gebaut werden. So kann ein Gelenk mit drei Freiheitsgraden (z.B. ein Kugelgelenk) mit Hilfe von drei eindimensionalen Gelenken und zwei Zwischengliedern mit der Länge Null zusammengestellt werden.

Die folgenden Gleichungen verkoppeln die kinematischen Parameter der Glieder im Paar.

$$\vec{\omega}_j = \vec{\omega}_{j-1} + \dot{q} \cdot \vec{e}_j \quad (4.2)$$

$$\vec{v}_j = \vec{v}_{j-1} - \vec{\omega}_{j-1} \times \vec{\Delta r}_{j-1,j} + \vec{\omega}_j \times \vec{\Delta r}_{j,j} \quad (4.3)$$

$$\dot{\vec{\omega}}_j = \dot{\vec{\omega}}_{j-1} + \ddot{q} \cdot \vec{e}_j + \dot{q} \cdot \vec{\omega}_{j-1} \times \vec{e}_j \quad (4.4)$$

$$\vec{\dot{v}}_j = \vec{v}_{j-1} - \vec{\dot{\omega}}_{j-1} \times \Delta \vec{r}_{j-1,j} - \vec{\omega}_{j-1} \times \left(\vec{\omega}_{j-1} \times \Delta \vec{r}_{j-1,j} \right) + \vec{\dot{\omega}}_j \times \Delta \vec{r}_{j,j} + \vec{\omega}_j \times \left(\vec{\omega}_j \times \Delta \vec{r}_{j,j} \right) \quad (4.5)$$

Aus diesen Formeln ist ersichtlich, dass die Winkel- und Linearbeschleunigung des Gliedes j linear von der generalisierten Beschleunigung \vec{q} abhängig sind. Ferner kann diese in folgender Matrixform dargestellt werden:

$$\vec{\dot{\omega}}_j = \begin{bmatrix} \vec{\alpha}_{j1} & \dots & \vec{\alpha}_{jj} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddots \\ q_1 \\ \vdots \\ \ddots \\ q_n \end{bmatrix} + \vec{\alpha}_j^0 \quad (4.6)$$

$$\vec{\dot{v}}_j = \begin{bmatrix} \vec{\beta}_{j1} & \dots & \vec{\beta}_{jj} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddots \\ q_1 \\ \vdots \\ \ddots \\ q_n \end{bmatrix} + \vec{\beta}_j^0 \quad (4.7)$$

wobei n der Anzahl der Glieder in der kinematischen Kette entspricht.

Die Koeffizienten $\vec{\alpha}_{j1} \dots \vec{\alpha}_{jj}, \vec{\alpha}_j^0$ und $\vec{\beta}_{j1} \dots \vec{\beta}_{jj}, \vec{\beta}_j^0$ werden definiert, wenn die Gleichungen (4.2 - 4.5) für die Glieder $1 \dots j$ in symbolischer Form abgeleitet werden und die entsprechenden Koeffizienten gruppiert werden.

Nachdem die kinematischen Parameter der Glieder einer kinematischen Kette definiert sind, müssen die auf die Glieder des jeweiligen Paares einwirkenden Kräfte betrachtet werden. Dafür werden zunächst die jeweiligen kinematischen Paare imaginär aufgeteilt (s. Abb.4.4 rechts). Dabei wirkt jeweils eine Kraft \vec{F}_j und ein Drehmoment \vec{M}_j von der Seite des Gliedes $j-1$ auf das Glied j ein. Nach dem Newtonschen Gesetz wird die Bewegung des Massenmittelpunktes auf folgende Weise definiert:

$$m_j \cdot \vec{\dot{v}}_j = m_j \cdot \vec{g}_j + \vec{F}_j - \vec{F}_{j+1} \quad (4.8)$$

Die Drehung eines Gliedes um den eigenen Massenmittelpunkt ergibt gemäß dem Eulerschen Gesetz:

$$J_j \cdot \vec{\dot{\omega}}_j + \vec{\omega}_j \times \left(J_j \cdot \vec{\omega}_j \right) = \vec{M}_j - \vec{M}_{j+1} - \Delta \vec{r}_{j,j} \times \vec{F}_j + \Delta \vec{r}_{j,j+1} \times \vec{F}_{j+1} \quad (4.9)$$

wobei $\vec{\varepsilon}_j$ und $\vec{\omega}_j$ der Winkelbeschleunigung bzw. der Winkelgeschwindigkeit des jeweiligen Gliedes entsprechen.

(4.2) und (4.9) stellen die Gleichungen dar, die dem Newton-Eulerschen Gesetz zugrunde liegen.

In Abbildung 4.5 ist das Modell eines anthropomorphen, aus einfachen eindimensionalen Gelenken aufgebauten Mechanismus während der Einzelstützphase dargestellt. In einer Einzelstützphase befindet sich der gesamte Mechanismus lediglich mit einem Bein (genannt Stützbein) im Kontakt zur Stützoberfläche. Sind beide Beine des Mechanismus im Kontakt zur Stützoberfläche, handelt es sich um eine Doppelstützphase.

Der Mechanismus kann aus mehreren verbundenen kinematischen Ketten bestehen (s. Abb. 4.5). Während der Fortbewegung des Mechanismus findet oft ein Wechsel zwischen der Einzelstützphase und der Doppelstützphase statt. Dabei wird die Konfiguration der kinematischen Kette, die die Beine beschreibt (1. Kette in Abb.4.5), zwischen einer geöffneten Kette (in der Einzelstützphase) und einer geschlossenen Kette (in der Doppelstützphase) umgeschaltet. Demzufolge unterscheiden sich auch die abgeleiteten Bewegungsgleichungen für die jeweilige Bewegungsphase erheblich. Die Bewegungsgleichungen können in folgender allgemeiner Form dargestellt werden:

$$P = D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) \quad (4.10)$$

Hier ist $P = [P_1 \dots P_n]$ - der Vektor der einwirkenden (auch treibenden) Kräfte bzw. Drehmomente in den Gelenken, $D(q)$ - die $(n \times n)$ Trägheitsmatrix, $h(q, \dot{q})$ - die Matrix der Gravitationskräfte, der Zentrifugalkräfte und Corioliskräfte, $q = [q_1 \dots q_n]$ der Vektor der generalisierten Koordinaten (hier Gelenkwinkel).

Aus Abbildung 4.5 ist ersichtlich, dass der Mechanismus ein verzweigtes Glied enthält, das die kinematischen Ketten verbindet und damit die kinematische Struktur komplexer macht. Die Berechnung der Dynamik für den gesamten Mechanismus, der aus komplexen kinematischen Ketten besteht, kann mit Hilfe der Serien von so genannten '++'-Gelenken durchgeführt werden. Dafür wird der Mechanismus im Gelenk i imaginär geteilt, wie es in Abbildung 4.5 rechts dargestellt ist. Das Gelenk i wird als '++'-Gelenk gekennzeichnet wenn das Glied j zu dem Teil des Mechanismus gehört, der mit dem Stützpunkt nicht verbunden ist. Bei der Betrachtung des anderen Gliedes wird eine andere Zahl der '++'-Gelenke entstehen. Der Einfluss des Gliedes j auf alle '++'-Gelenke wird in den Elementen der Matrizen in (4.10) berücksichtigt [136].

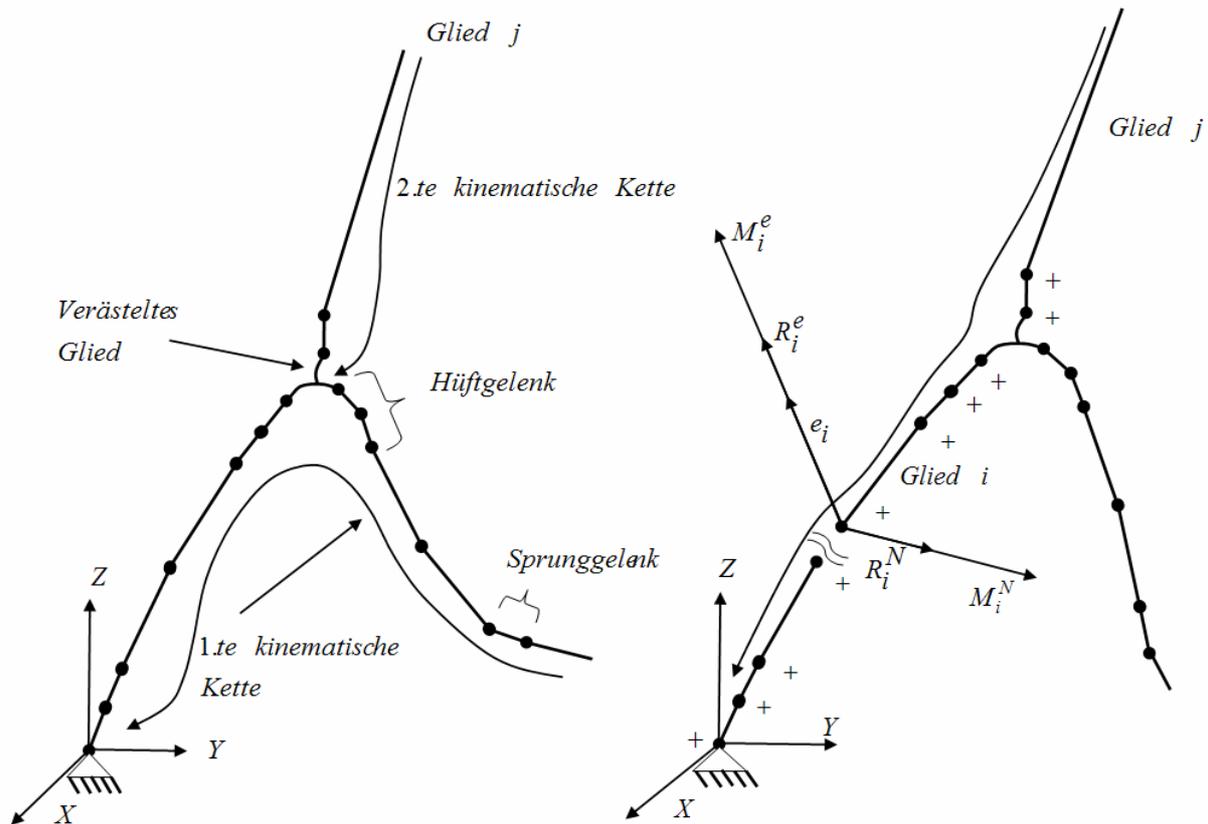


Abb. 4.5 - Einzelstützphase des anthropomorphen Mechanismus und Gleichgewicht des „geteilten“ Mechanismus

Die Komponenten der Matrix h in (4.10) werden auf folgende Weise definiert:

$$\begin{aligned} \Delta H_{ik}^j &= -\vec{e}_i \cdot \left(\vec{b}_{jk} + \Delta \vec{r}_{ji} \times \vec{a}_{jk} \right) \\ \Delta h_i^j &= -\vec{e}_i \cdot \left(\vec{r}_{ji} \times \left(\vec{a}_j^0 + m_j \cdot \vec{g} \right) + \vec{b}_j^0 \right) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Wobei $\Delta \vec{r}_{ji}$ der Vektor von Gelenk i zum Massenmittelpunkt des Gliedes j und k die Gesamtanzahl der Gelenke ist.

Die Koeffizienten \vec{a} , \vec{b} werden durch die Komponenten $\vec{\alpha}_{ij}, \vec{\alpha}_i^0, \vec{\beta}_{ij}, \vec{\beta}_i^0$ in folgender Form definiert:

$$\vec{a}_{ij} = -m_i \cdot \vec{\beta}_{ij} \quad (4.12)$$

$$\vec{a}_i^0 = -m_i \cdot \vec{\beta}_i^0 \quad (4.13)$$

$$\vec{b}_{ij} = -T_i \cdot \vec{\alpha}_{ij} \quad (4.14)$$

$$\vec{b}_i^0 = -T_i \cdot \vec{\alpha}_i^0 + \vec{\lambda}_i \quad (4.15)$$

Komponente T_i ist (3×3) -Matrix mit folgenden Elementen:

$$T_i^{jk} = \sum_{l=1}^3 p_{il}^k \cdot p_{il}^j \cdot \tilde{J}_{il} \quad (4.16)$$

Hier gilt:

p_i sind die Grundvektoren des Koordinatensystems des Gliedes i ,

p_{il} ist der Grundvektor der 1., 2. oder 3. Achse ($l = 1, 2, 3$),

p_{il}^k ist der entsprechende k -te Teil des Grundvektors ($k = 1, 2, 3$),

\tilde{J}_{il} ist die l, l -te Teil der Hauptdiagonalelemente des Trägheitstensors des Gliedes i

$$\vec{\lambda}_i = \begin{Bmatrix} \lambda_i^1 \\ \lambda_i^2 \\ \lambda_i^3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{i1}^1 & p_{i2}^1 & p_{i3}^1 \\ p_{i1}^2 & p_{i2}^2 & p_{i3}^2 \\ p_{i1}^3 & p_{i2}^3 & p_{i3}^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} (\tilde{J}_{i2} - \tilde{J}_{i3}) \cdot (\omega_i \cdot p_{i2}) \cdot (\omega_i \cdot p_{i3}) \\ (\tilde{J}_{i3} - \tilde{J}_{i1}) \cdot (\omega_i \cdot p_{i3}) \cdot (\omega_i \cdot p_{i1}) \\ (\tilde{J}_{i1} - \tilde{J}_{i2}) \cdot (\omega_i \cdot p_{i1}) \cdot (\omega_i \cdot p_{i2}) \end{Bmatrix} \quad (4.17)$$

Durch die Summierung der dargestellten Komponenten für die Glieder j des Mechanismus werden die Matrizen H und h bestimmt:

$$H_{ik} = \sum_{(j)} \Delta H_{ik}^j \quad (4.18)$$

$$h_i = \sum_{(j)} \Delta h_i^j \quad (4.19)$$

Auf diese Weise können die Bewegungsgleichungen für den Mechanismus in der Einzelstützphase abgeleitet werden.

Die Ableitung der Bewegungsgleichungen in der Doppelstützphase weist einige Besonderheiten auf. Bei der Untersuchung der geschlossenen kinematischen Kette wird die äquivalente geöffnete Kette als Basis betrachtet (s. Abb. 4.6). Dabei müssen die letzten Glieder der Ketten am Anfang nicht unbedingt kongruieren. Hier kann eine Translation $\Delta \rho$ und eine solche Drehung $\Delta \sigma$ so bestimmt werden, dass die Koordinatensysteme der Ketten kongruieren. Da die geschlossene Kette als eine äquivalente geöffnete kinematische Kette betrachtet wird, ist

es möglich hier die oben beschriebene Methode für geöffnete kinematische Ketten zu verwenden.

Weil die Bewegung des Mechanismus im Raum während der Doppelstützphase in Vergleich zur Einzelstützphase begrenzt ist, verliert die geschlossene Kette im Ergebnis einige Freiheitsgrade. Es wird angenommen, dass die Positionen der Randglieder der geschlossenen Kette bekannt sind. Die so genannten Hauptkoordinaten werden zunächst frei gewählt. Die anderen zur Kette gehörenden Koordinaten (Nebenkoordinaten) können i. A. durch die Hauptkoordinaten und Werte $\Delta\rho$ und $\Delta\sigma$ ermittelt werden:

$$\Delta S = \Lambda \cdot \Delta u + \Lambda_1 \cdot \Delta\rho + \Lambda_2 \cdot \Delta\sigma \quad (4.20)$$

wobei $\Lambda, \Lambda_1, \Lambda_2$ die entsprechenden Bindungsmatrizen,

ΔS - das Inkrement der Nebenkoordinaten,

Δu - das Inkrement der Hauptkoordinaten ist.

Es wird angenommen, dass die Hauptkoordinaten sowie die Translation $\Delta\rho$ und Drehung $\Delta\sigma$ vorgegeben sind und dass die Bindungsmatrizen definiert sind. Sobald das Inkrement ΔS der Nebenkoordinaten gefunden ist, sind die Nebenkoordinaten nach folgender Gleichung zu finden:

$$S = \Delta S + S_0 \quad (4.21)$$

Hier sind S_0 - die Anfangswerte der Nebenkoordinaten.

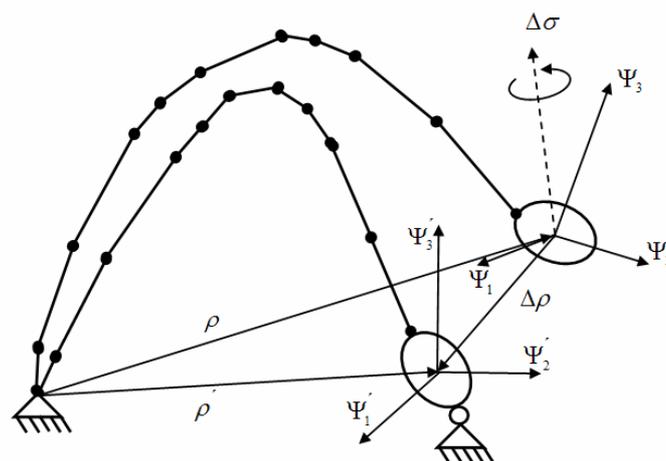


Abb. 4.6 - Geschlossene kinematische Kette während der Doppelstützphase und äquivalente geöffnete kinematische Kette.

Auf diese Weise wird ein iteratives Verfahren dargestellt, das die Nebenkoordinaten sowie die Nebengeschwindigkeiten berechnet. Durch (4.20) können die Nebenkoordinaten i. A. nicht genau ermittelt werden. Der Zusammenbau der Kette wird daher nicht möglich. Zur Lösung

dieses Problems muss das iterative Verfahren mit anderen Anfangsbedingungen wiederholt werden, damit die Kriterien der Kettenzusammenbau erfüllt werden.

Alternativ zu dem dargestellten Verfahren wurde die Ableitung der Bewegungsgleichungen nach der Lagrange-Euler-Methode untersucht. Im Unterschied zur Newton-Euler-Methode werden die Bewegungsgleichungen nach der Lagrange-Euler-Methode sowohl in der Einzelstützphase als auch in der Doppelstützphase auf gleiche Weise ermittelt. Ein anderer Vorteil der Lagrange-Euler-Methode besteht darin, dass die äußeren Kräfte und Drehmomente zu generalisierten Kräften mit Hilfe von entsprechenden Jakobianen reduziert werden können. Die Newton-Euler-Methode ist jedoch vorteilhaft für Mechanismen mit einer großen Anzahl von Freiheitsgraden. Dieser Vorteil hat sich bei der Untersuchung des in der vorliegenden Arbeit dargestellten zweibeinigen Roboters ROTTO als besonders wichtig erwiesen. Weiterhin ermöglicht die Newton-Euler-Methode die Berücksichtigung der dynamischen Bindungen in Gelenken, was jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet wird.

4.2 Allgemeine Darstellung der ballistischen Raumbewegungen

Einen möglichst menschenähnlichen Gang nachzubilden, ist das ehrgeizige Ziel mehrerer Forscher auf dem Gebiet humanoider Roboter. Dabei wird eine direkte Übernahme der Bewegungstrajektorien vom Menschen oft als Referenz betrachtet. Ein gewünschtes Bewegungsmuster wird in diesem Ansatz beim Menschen gemessen und auf die Gelenke des Roboters übertragen. Zahlreiche Untersuchungen zum menschlichen Gang liefern hierbei die notwendigen Daten über die Gelenkwinkelverläufe beim Gehen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten.

Dennoch bereitet ein direktes Übertragen der menschlichen Trajektorien auf ein Robotersystem mehrere Probleme. Durch die Anzahl und Orientierung der Freiheitsgrade, Länge der einzelnen Gliedmaßen und insbesondere die Verteilung der Massen und Trägheiten unterscheiden sich die Eigenschaften des Roboters vom natürlichen Vorbild erheblich. Dadurch können sehr schnell die wichtigsten Eigenschaften des menschlichen Ganges wie Energieeffizienz und natürliches Aussehen verloren gehen. Um dieses Problem zu lösen, müssen effiziente Algorithmen zur Generierung der Bewegungstrajektorien entwickelt werden, die nicht nur alle mechanischen Randbedingungen des Roboters berücksichtigen, sondern auch den stabilen Gang auf zwei Beinen sicherstellen.

Wie bereits in Kapitel 1 dargestellt, existieren eine Vielzahl von Methoden zur Erzeugung von Bewegungstrajektorien. Als Lösungen werden die Ansätze von simplen Versuch-und-Irrtum Methoden bis hin zu komplexen Optimierungsverfahren mit unterschiedlichsten Minimierungskriterien wie Energie- oder Steuerungsaufwand vorgeschlagen. Eine verbreitete intuitive Anforderung an die Generierung der Bewegungstrajektorien ist die Erhaltung der Stabilität in dem Sinne, dass diese nicht zu einer unumkehrbaren fallenden Bewegung führt. Als Beispiel kann hier ein Linear Inverted Pendulum Model (LIPM) zusammen mit dem Zero Moment Point (ZMP) Kriterium genannt werden. Die Bewegung des Roboters wird dabei stark vereinfacht als die Bewegung des inversen Pendels betrachtet und durch die Berücksichtigung des ZMP auf einen „stabilen“ Rahmen begrenzt. Obwohl dieses Verfahren der Generierung der Bewegungstrajektorien den aktuell erfolgreichsten zweibeinigen Robotern zur Grunde liegt, fehlt es dabei oft an natürlichem Aussehen und dieses Verfahren begrenzt außerdem die dynamischen Eigenschaften des Systems.

Eine sehr naheliegende Anforderung an die Generierung der Bewegungstrajektorien stellt die Tauglichkeit der Trajektorie zum einfachen Abarbeiten mit der eigenen Dynamik des Roboters ohne weitgehenden Regeleingriff. In Rahmen dieser Arbeit wurde ein Ansatz zur Generierung solcher Trajektorien vorgeschlagen. Da die generierten Trajektorien im Grunde der freien Bewegung des Roboters entsprechen, werden sie als „ballistische“ Trajektorien bezeichnet.

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des ballistischen Ansatzes zur Generierung der Bewegungstrajektorien dargestellt und analysiert. Mit dem Ziel der Vereinfachung der Beschreibung wird zunächst ein flacher zweibeiniger Mechanismus betrachtet, der aus insgesamt fünf charakteristischen Gliedmaßen mit endlichen Gewicht besteht: einem Körper und zwei gleiche Beine bestehend aus Schenkel und Unterschenkel. Die mechanischen Parameter entsprechen dabei den Maßen und Längen des entwickelten Roboters ROTTO.

4.2.1 Grundlagen der ballistischen Trajektorien

Die Untersuchungen der biomechanischen Eigenschaften des menschlichen Gehens stellen mehrere Gesetzmäßigkeiten fest. Aus [69, 70] und [93 -96] geht hervor, dass die Aktivität der Muskeln während der Bewegung lediglich in bestimmten Zeitabschnitten gegeben ist. In den Zeitabschnitten zwischen der Muskelaktivierung hat die Bewegung des Menschen große Ähnlichkeit mit ballistischer Bewegung. Dabei bewegt sich der Mensch in der Zeit zwischen der Muskelaktion auf einer freien „ballistischen“ Bahn mit der eigenen Dynamik der Gliedmassen fast ohne zusätzliche Energie. Diese Bewegung resultiert direkt aus der Umverteilung der kinetischen und aus der Umwandlung der potentiellen Energie in kinetische Energie des Körpers und der Gliedmaßen. Aus diesem Grund kann eine solche Bewegung als energieeffizient oder auch energieoptimal betrachtet werden.

Im Fall eines mobilen Roboters kann die dargestellte ballistische Bewegung durch bestimmte Ansteuerung von Gelenkantrieben realisiert werden. Aus mathematischer Sicht kann eine solche Ansteuerung neben der Vielfalt von möglichen Steuerungen durch eine Impulssteuerung erfolgen [93-96]. Die Impulssteuerung wurde hier aus Vereinfachungs- und Flexibilitätsgründen gewählt. Es wird dennoch explizit darauf hingewiesen, dass der beschriebene Ansatz zur Erzeugung ballistischer Trajektorien lediglich als mathematisches Werkzeug bei der Generierung und Analyse der Trajektorien betrachtet wird. Er kann aufgrund der physikalischen Randbedingungen nicht direkt zur Antriebsansteuerung verwendet werden. Ferner werden die daraus resultierenden Trajektorien als Referenzen für das Steuerungssystem des mobilen Roboters gesehen.

Aufgabenstellung der Impulssteuerung

Zunächst wird ein aus fünf Gliedmaßen bestehender Mechanismus ohne Füße betrachtet. In der Einzelstützphase wird angenommen, dass das Stützbein mit der Oberfläche mit Hilfe eines Gelenks verbunden ist.

Die Anfangsposition $q[0]$ und die Endposition $q[T]$ des Mechanismus am Anfang bzw. am Ende der Einzelstützphase werden durch generalisierte Koordinaten q definiert. Die Variable T definiert die Dauer der Einzelstützphase.

Die Aufgabe der Impulssteuerung ist, den Mechanismus von einer Anfangskonfiguration $q[0]$ in Zeitpunkt $t=0$ in eine Endkonfiguration $q[T]$ in Zeitpunkt $t=T$ umzustellen. Als

Steuerungseingriffe werden die Idealimpulse angenommen, die der Impulsfunktion $\delta(t)$ entsprechen:

$$E_{\tau}(t) = E^0 \cdot \delta(t) + E^T \cdot \delta(t-T) \quad (4.22)$$

Hier sind $\delta(t), \delta(t-T)$ die Delta-Funktionen und E^0 und E^T sind die Vektoren der Impulsintensitäten zu den Zeitpunkten $t=0$ und $t=T$, die den realen Kräften entsprechen. Die Vektoren E^0 und E^T werden wie folgt definiert:

$$E^0 = [E_{\tau}^0, E_{R_L}^0, E_{R_R}^0, E_{M_z^L}^0, E_{M_z^R}^0] \quad (4.23)$$

wobei $E_{\tau}^0 = [E_{\tau_1}^0, E_{\tau_2}^0, \dots, E_{\tau_{14}}^0]$ - die Impulse der entsprechenden Gelenkmomente enthält.

$E_R^0 = [E_{R_x}^0, E_{R_y}^0, E_{R_z}^0]$ - die Impulse der Bodenreaktionskräfte.

$E_{M_z}^0$ - der Impuls des Reaktionsmomentes ist.

$$E^T = [E_{\tau}^T, E_{R_L}^T, E_{R_R}^T, E_{M_z}^T] \quad (4.24)$$

Es wird angenommen, dass die Impulse lediglich in Zeitpunkt t_i agieren, in dem das übertragene Bein noch im Kontakt mit der Oberfläche ist, und zum Zeitpunkt $t_i + T$, in dem das übertragene Bein auf die Oberfläche gestellt wird. Während des Zeitintervalls $t_i < t < t_i + T$ zwischen den beiden Impulseinwirkungen bewegt sich der Mechanismus ohne zusätzliche Energiezufuhr ballistisch (s. Abb. 4.7).

Bei Einwirkung der Impulse auf den Mechanismus im Zeitpunkt t_i ändern sich die Winkelgeschwindigkeiten der Gelenke sowie die Lineargeschwindigkeit des Massenmittelpunktes sprunghaft:

$$\Delta q[t_i] = q[t_i + 0] - q[t_i - 0] \quad (4.25)$$

Da die Positionskoordinaten des Mechanismus durch die Integration der Geschwindigkeiten ermittelt werden, können sich diese während eines unendlich kleinen Zeitabschnittes $\Delta t_i = [t_i - 0, t_i + 0]$ nicht sprunghaft ändern. Die kinetische Energie des Mechanismus ist

von den generalisierten Koordinaten $[q], [\dot{q}]$; die potenzielle Energie ist lediglich von $[q]$ abhängig. Daraus ist ersichtlich, dass die Energie der einwirkenden Impulse in die kinetische Energie des Mechanismus umgewandelt wird.

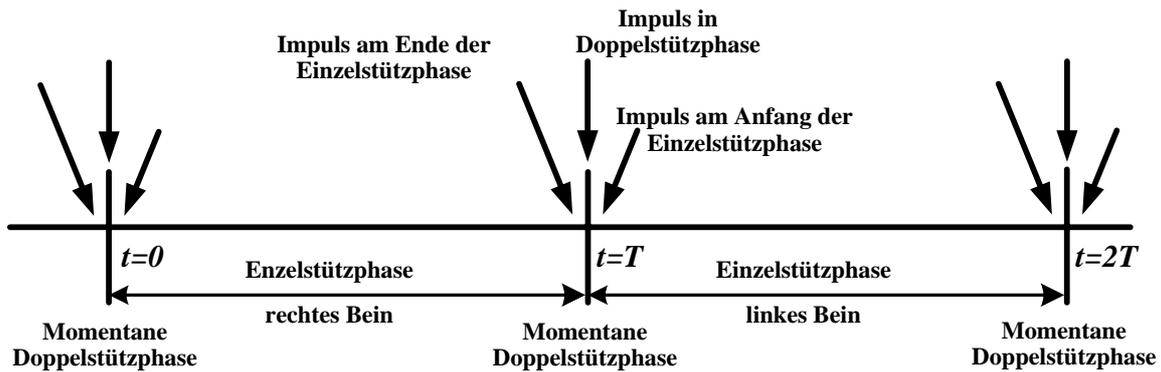


Abb. 4.7 – Drei Phasen der momentanen Doppelstützphase

Die Bewegungsgleichungen des Mechanismus werden in folgender Form dargestellt:

$$D(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) + h(q) = \tau_{\Sigma} \quad (4.26)$$

wobei τ_{Σ} der Vektor aller auf den Mechanismus einwirkenden realen Kräfte (Gelenkmomente und Bodenreaktionskräfte) ist.

Für den Impuls des mechanischen Systems gilt:

$$P = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \quad (4.27)$$

wobei L – die Lagrange-Funktion ist.

Für ein mechanisches System kann die Lagrange-Funktion auf folgende Weise beschrieben werden:

$$L = T(q, \dot{q}) - U(q) \quad (4.28)$$

Wobei T – die kinetische Energie des mechanischen Systems ist und

U – potenzielle Energie des mechanischen Systems ist.

Für die kinetische und potenzielle Energie gilt [134]:

$$T(q, \dot{q}) = \sum_{k=1}^n \frac{\dot{q}_k^T \cdot D(q) \cdot \dot{q}_k}{2} \quad (4.29)$$

$$U(q) = - \sum_{k=1}^n m_k \cdot \vec{g}_i \cdot \vec{C}_k(q)$$

Wobei \dot{q}_k - die Geschwindigkeit des Gelenks k ;

m_k – die Masse des Gelenks k ;

$D(q)$ – Trägheitstensor des mechanischen Systems und

$\vec{C}_k(q)$ - der Vektor-Radius des Massenmittelpunktes im Bezug auf Gelenk $k-1$ ist.

Aus (4.27), (4.28) und (4.29) für den Impuls des mechanischen Systems gilt:

$$P = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = \frac{\partial T(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial U(q)}{\partial \dot{q}}$$

Dann können die Geschwindigkeitssprünge auf folgende Weise gefunden werden:

$$\Delta \dot{q}[t_i] = D(q[t_i])^{-1} \cdot E_{\tau_{\Sigma}} \quad (4.30)$$

Hier ist $E_{\tau_{\Sigma}}$ - die Impulsintensität zum Zeitpunkt t_i .

Die Gleichung (4.30) beschreibt die Abhängigkeit zwischen Impulsen und den Sprüngen der Geschwindigkeiten des Mechanismus.

Die Steuerungsimpulse können sowohl in der Einzelstützphase als auch in der Doppelstützphase agieren. Während der Einzelstützphase ist ein Bein des Mechanismus mit der Oberfläche verbunden. Ein anderes Bein ist dabei frei und wird in die gewünschte Position übertragen. Um den Mechanismus vom Anfangszustand $q[0]$ in den Endzustand $q[T]$ zu überführen, müssen alle Antriebe des Mechanismus am Anfang der Einzelstützphase durch entsprechende Impulse sprunghafte Änderungen der Geschwindigkeiten ermöglichen. Auf dieser Weise muss eine Impulssteuerung E_0 so eingesetzt werden, dass der Mechanismus während der Einzelstützphase vom Punkt $q[0]$ in den Punkt $q[T]$ während der Zeit T umgestellt wird. D.h., es muss eine Funktion $q[t]$ gefunden werden, die durch die Punkte $q[0]$ und $q[T]$ geht. Die Funktion $q[t]$ stellt die Lösung des Systems der Gleichungen (4.31), der entsprechenden ballistischen Bewegung des Mechanismus in Einzelstützphase:

$$D(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) + h(q) = 0 \quad (4.31)$$

Die Nullsetzung des Kraftvektors in (4.31) weist darauf hin, dass die Antriebe in den Gelenken während der ballistischen Bewegung ausgeschaltet sind und keine zusätzliche externe Energie hinzugefügt wird.

Aus (4.30) folgt, dass der Vektor E_0 durch die Geschwindigkeitssprünge $\Delta \dot{q}[0]$ ermittelt werden kann. Um den Vektor $\Delta \dot{q}[0]$ und damit die Impulssteuerung E_0 zu ermitteln, muss die Randwertaufgabe für das System der Differenzialgleichungen (4.31) bei den vorgegebenen Randbedingungen $q[0]$ und $q[T]$ gelöst werden.

Die Fortbewegung des Mechanismus auf einer ebenen Oberfläche kann mit Hilfe der Impulssteuerung in folgender Weise erzielt werden. Die Impulse E_0 werden auf den Mechanismus am Anfang der Einzelstützphase angewendet und rufen die Sprünge der Geschwindigkeiten $\Delta \dot{q}[0]$ hervor. Der Mechanismus bewegt sich in der Folge der angelegten

Impulse ballistisch und kommt in der Konfiguration $q[T]$ zum Zeitpunkt T mit den Endgeschwindigkeiten $\dot{q}[T-0]$ an. Das übertragene Bein des Mechanismus berührt anschließend die Oberfläche. Daraufhin werden die Bremsimpulse E_T zum Zeitpunkt T eingebracht und die Endgeschwindigkeiten $\dot{q}[T-0]$ zurückgesetzt. Nachdem die Impulse E_T eingebracht wurden, erfolgt der Beinwechsel. Dabei wird die Bindung von Stützbein gelöst und auf das übertragene Bein umgelegt. Die Organisation der Impulssteuerung für die nächste Einzelstützphase erfolgt in gleicher Reihenfolge.

Die dargestellte Methode der Impulssteuerung ist im allgemeinen Fall nicht energieoptimal, weil diese nach Beschleunigung des Mechanismus auch abschließende Abbremsung zum Zeitpunkt T erfordert. Durch die Bremsimpulse wird die wertvolle kinetische Energie zurückgesetzt und verloren. Um das zu vermeiden ist eine Vereinigung der Phasen der Beschleunigung und der Abbremsung notwendig. Während der Doppelstützphase erfolgt der Wechsel des Stützbeines mit gleichzeitiger Impulseinwirkung. Dabei findet eine solche Umverteilung der Geschwindigkeiten (und damit auch der kinetischen Energie) des Mechanismus statt, dass der Mechanismus während der nächsten Einzelstützphase die vorgegebene Endposition erreicht. Die Dauer der Doppelstützphase während des normalen Laufvorgangs des Menschen beträgt weniger als ein fünftel der Gesamtschrittdauer. Aus diesem Grund wird in Rahmen dieser Arbeit die Dauer der Doppelstützphase während des Laufvorgangs bei der Untersuchung der Robotermodelle als unendlich klein angenommen. Um eine erforderliche sprunghafte Änderung der Geschwindigkeiten von $\dot{q}[T-0]$ auf $\dot{q}[T+0]$ zu ermöglichen, rufen die während der Doppelstützphase eingelegten Impulse die Umverteilung der Energie hervor, so dass die nötige ballistische Bewegung während der nächsten Einzelstützphase realisiert wird.

Abbildung 4.8 zeigt die Struktur der Impulssteuerung des Mechanismus für die Realisierung der Roboterbewegung.

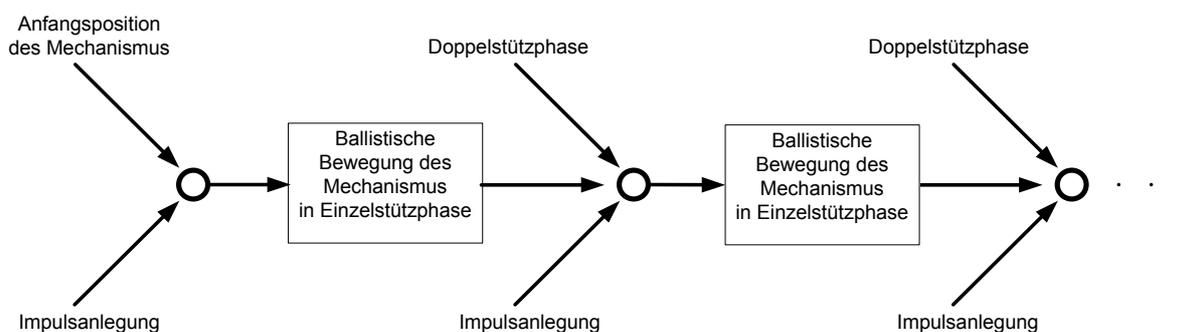


Abb. 4.8 - Struktur der Impulssteuerung für ballistische Bewegung des Roboters

Für die Berechnung der ballistischen Bewegung des Mechanismus muss die Randwertaufgabe für das System der Differenzialgleichungen, die die Bewegung des Roboters während der Einzelstützphase beschreiben, gelöst werden. Im Ergebnis werden die erforderlichen Anfangs- und Endgeschwindigkeiten ermittelt.

Eine direkte technische Realisierung der dargestellten Impulssteuerung ist unmöglich, da die Wirkung der unendlich großen Kräfte während des unendlich kleinen Zeitabschnitts vorausgesetzt wird. Es existiert gewiss keine solche Impulssteuerung in der Natur. Dennoch

kann die Krafteinwirkung, die annähernd zur Impulseinwirkung ist, bei den Kraftquellen wie Muskeln des Menschen, pneumatischen Antriebe und andere erzeugt werden.

Da die direkte Impulssteuerung technisch unmöglich erscheint, wird die Realisierung der Roboterbewegung nach ballistischen Trajektorien für den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten mobilen Roboter ROTTO nach folgendem Prinzip gestaltet. Es werden unter Verwendung eines genaueren Robotermodells die für aktuelle dynamische Eigenschaften optimale ballistische Bewegungstrajektorien aller Robotergelenke gefunden. Diese Bewegungstrajektorien werden als Referenztrajektorien an das Steuerungssystem des Roboters gegeben. Obwohl die Referenztrajektorien unter Verwendung des genauen Robotermodells mit allen relevanten dynamischen Eigenschaften gefunden worden sind, können diese an einem realen Roboter lediglich mit dynamischen Fehlern abgearbeitet werden. Die Fehler entstehen dabei aufgrund der unberücksichtigten trockenen bzw. viskosen Reibung in den Getrieben, Motoren und Robotergelenke sowie aufgrund der vorhandenen Ungenauigkeit des Modells. Folglich kann eine ballistische Bewegung des realen Roboters lediglich bedingt als freie ballistische Bewegung betrachtet werden. Dennoch wird eine solche Bewegung des realen Roboters aufgrund der geringen Abweichung der entsprechenden dynamischen Eigenschaften in Rahmen dieser Arbeit als „ballistische“ Bewegung angenommen.

Numerische Lösung der Randwertaufgabe

Wie bereits im vorigen Abschnitt dargestellt, muss als Lösung der gestellten Randwertaufgabe einen solcher Vektor der Anfangsgeschwindigkeiten $\dot{q}[0]$ ermittelt werden, sodass die Lösung des Systems der Differenzialgleichungen (4.31) von einem Phasenzustand $q[0], \dot{q}[0]$ im Zeitpunkt $t=0$ sich in der vorgegebenen Konfiguration $q[T]$ zum Zeitpunkt $t=T$ findet. Zunächst werden die Geschwindigkeiten $\dot{q}[0]_{prob}$ als die Anfangsannäherung angenommen. Mit dieser Anfangsannäherung kann das Cauchy-Problem gelöst werden. Das untersuchte System der Differenzialgleichungen wird dabei mit vorgegebenen Anfangswerten $\dot{q}[0]_{prob}$ und $q[0]$ integriert.

Als Ergebnis der Lösung des Cauchy-Problems wird der Vektor der Endposition $q[T]_{prob}$ ermittelt, der mit der gewünschten Endposition $q[T]$ des Mechanismus nicht unbedingt übereinstimmt. Das folgende Kriterium kann für die Einschätzung der Abweichung des Mechanismus von seinem vorgegebenen Zustand eingeführt werden:

$$I = \sum_{i=1}^n [\Delta q_i(T)]^2 \quad (4.32)$$

Hier ist $\Delta q_i(T) = q_i(T) - q_{prob_i}(T)$ - die Abweichung der entsprechenden Komponente des Vektors $q[T]_{prob}$ und n - die Ordnung des Systems der Bewegungsgleichungen für die Einzelstützphase.

Der Wert I ist von dem Vektor $\dot{q}[0]_{prob}$ abhängig, d.h. $I = I[\dot{q}[0]_{prob}]$. Der gesuchte Vektor $\dot{q}[0]_{prob} = \dot{q}[0]$, falls dieser existiert, bewirkt das Kriterium $I=0$. Der Wert I ist positiv

oder gleicht Null bei beliebigen Werten $\dot{q}[0]_{prob}$, deswegen hat dieser auch ein globales Minimum $I=0$. Der beschriebene Algorithmus ist in Abb. 4.9 dargestellt:

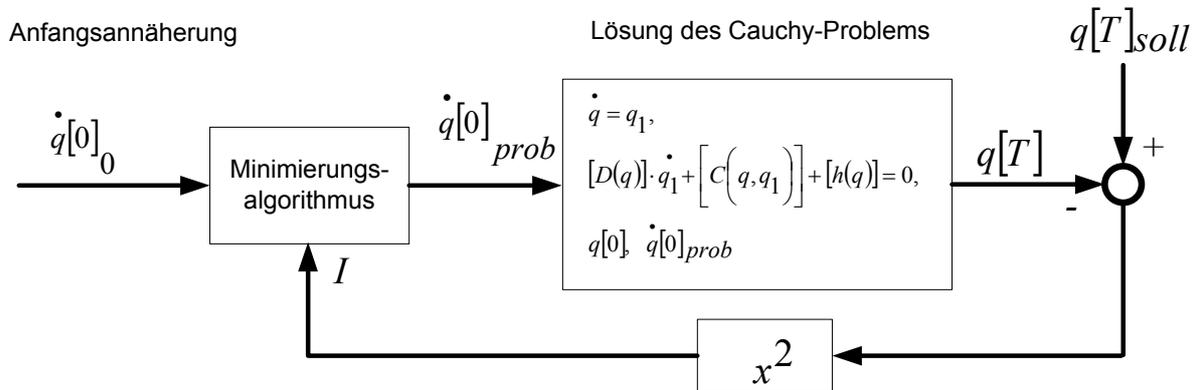


Abb. 4.9 - Lösung der Randwertaufgabe durch die Lösung des Cauchy-Problems

Bei der Minimierung der Zielfunktionen wurden die Standardfunktionen der Pakete *Optimization Toolbox* der mathematischen Umgebung *Matlab* verwendet. Zur Integrierung der Differentialgleichungen wurden adaptive Methoden der Runge-Kutte 4.ter und 5.ter Ordnung verwendet. Die numerischen Lösungen der Randwertaufgabe zeigten, dass die Lösung des Cauchy-Problems für das System (4.31) bei ausgewählten Parametern des Mechanismus sehr empfindlich bei Änderung der Parameter sowie bei Änderung der Anfangsbedingungen $q[0], \dot{q}[0]_{prob}$ ist. Wegen des großen Suchraums und des nichtlinearen Charakter des Systems weist der Iterationsprozess deutlich schlechte Konvergenz auf. Das kann auf folgender Weise erklärt werden. Die zu minimierende Zielfunktion I ist die Funktion der n - Variablen $\dot{q}[0]_{prob}$. Während der Minimierung bewegt sich die Zielfunktion I im $(n+1)$ - dimensionalen Raum und das Minimierungsverfahren versucht ein globales Minimum in diesem Raum zu finden. Da die analytische Form des Jakobians der Zielfunktion praktisch unmöglich zu finden ist, ist die Form der I - Funktion in $(n+1)$ - dimensionalem Raum i. A. unbekannt und der aktuelle Wert der I - Funktion kann in ein lokales Minimum geraten. Mit der steigenden Ordnung des Systems verschlechtert sich die Konvergenz der Lösung erheblich.

4.2.2 Eigenschaften der ballistischen Trajektorien

Die dargestellten, ballistischen Trajektorien weisen weitere wichtige Eigenschaften auf, die bei der Generierung und Analyse der Bewegung zur Hilfe stehen. Vor allem werden hier spezifische Symmetrie-Eigenschaften dargestellt, die jedoch bestimmte Randbedingungen an die Massenverteilung stellen. So sind diese Eigenschaften lediglich für Systeme mit symmetrischer Massenverteilung gültig, d.h. die Massenmittelpunkte der einzelnen Gelenke müssen an der Linie zwischen den entsprechenden Gelenken liegen und die Verteilung der Massenmittelpunkte muss für beide Beine gleich sein.

Das System der Bewegungsgleichungen für die Einzelstützphase ist konservativ. Deswegen existiert ein Energieintegral:

$$E = \frac{1}{2} \dot{q}^* D(q) \dot{q} + V(q) = const \quad (4.33)$$

wobei $V(q)$ – die potenzielle Energie des Systems darstellt.

Für einen Mechanismus mit symmetrischer Massenverteilung mit Bewegungsgleichungen (4.31) gelten folgende Symmetrie-Eigenschaften.

1. Wenn die Funktion $q(t)$ die Lösung des Systems (Abb.4.9) ist, dann ist die Funktion $-q(t)$ ebenfalls die Lösung des Systems. In diesem Fall ist die Konfiguration $-q(t)$ des Mechanismus symmetrisch zu der Konfiguration $q(t)$ in Bezug auf die vertikale Achse, die durch den Fußgelenk des Stützbeines geht.

2. Wenn die Funktion $q(t)$ die Lösung des Systems (Abb.4.9) ist, dann ist die Funktion $q(-t)$ ebenfalls die Lösung des Systems.

Das schematische Diagramm der Bewegung $q(-t)$ kann durch Betrachtung des Diagramms der Bewegung $q(t)$ in umgekehrter Reihenfolge ermittelt werden. Wenn die Vorwärtsbewegung des Roboters einer Lösung $q(t)$ des Systems entspricht, beschreibt die Lösung $q(-t)$ die entsprechende Rückwärtsbewegung. Diese Eigenschaft kann leicht überprüft werden, wenn $q(t)$ durch $q(-t)$ im System (Abb.4.9) ersetzt wird.

Aufgrund der Autonomität hat das System (Abb.4.9) neben der Lösung $q(t)$ auch eine Lösung $q(T+t)$, wobei T eine beliebige Zahl ist. Unter Berücksichtigung von Eigenschaft 2 entsteht daraus auch folgende Eigenschaft:

3. Wenn die Funktion $q(t)$ die Lösung des Systems (Abb.4.9) ist, dann ist die Funktion $q(T-t)$ ebenfalls die Lösung des Systems.

Aus Eigenschaften 1 und 3 folgt:

4. Wenn die Funktion $q(t)$ die Lösung des Systems (Abb.4.9) ist, dann stellt die Funktion $-q(T-t)$ ebenfalls die Lösung des Systems dar.

Wenn die Lösung $q(t)$ eine ballistische Bewegung des Systems beschreibt, entspricht die Lösung $-q(T-t)$ ebenfalls einer ballistischen Bewegung des Systems

Unter Annahme der symmetrischen Randkonfigurationen $q(0)$ und $q(T)$ gilt:

$$q(0) = -q(T) \quad (4.34)$$

Wenn die Lösung $q(t)$ der Randwertaufgabe Abb.4.9 existiert und die einzige Lösung für die beschriebene symmetrische Konfiguration ist, folgt aus der Eigenschaft 4:

$$q(t) \equiv -q(T-t) \quad (4.35)$$

Das Diagramm der Bewegung, die der Gleichung (4.35) entspricht, ist symmetrisch im Bezug auf die vertikale Achse, die durch den Fußgelenk des Stützbeines läuft. Aus (4.35) folgt $q(T/2)=0$, und dementsprechend liegen alle Gelenke des Roboters im Zeitpunkt $T/2$ auf der vertikalen Achse. Aufgrund der Symmetrie bewegt der Roboter während des Zeitabschnitts $0 < t < T/2$ das Bein mit dem Knie „nach vorne“ und während des Zeitabschnitts $T/2 < t < T$ mit dem Knie „nach hinten“. In Abbildung 4.10 ist das entsprechende Diagramm der Bewegung bei der symmetrischen Lösung der nichtlinearen Randwertaufgabe dargestellt.

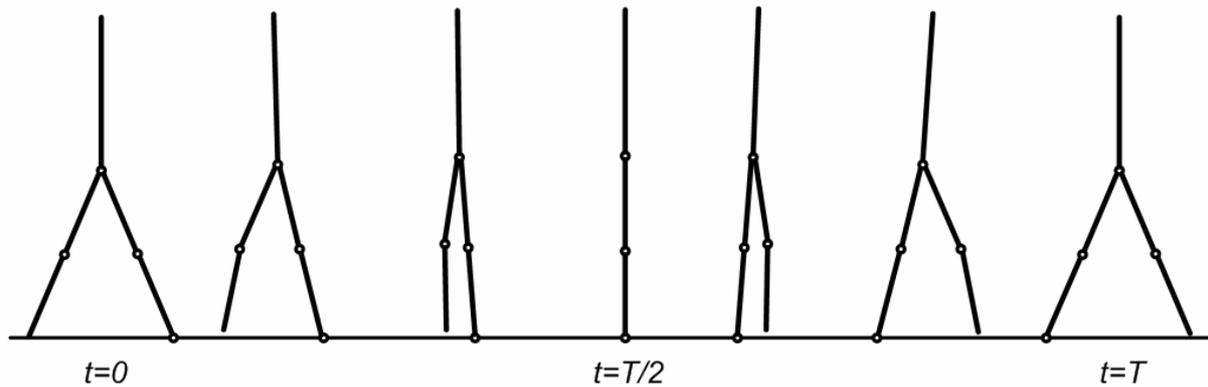


Abb. 4.10 – Symmetrische Lösung der nichtlinearen Randwertaufgabe

5. Die Gleichung $q(T/2)=0$ existiert lediglich für die symmetrische Lösung mit der Bedingung (4.35). Die symmetrische Lösung kann durch eine Erweiterung der Lösung mit den Randbedingungen $q(0)$ und $q(T/2)=0$ für den Zeitabschnitt $[0, T]$ ermittelt werden.

Die dargestellten symmetrischen Eigenschaften sind sehr hilfreich bei der numerischen Lösung und Analyse der Randwertaufgabe.

Das Diagramm in Abbildung 4.10 zeigt keine Menschen ähnliche Bewegung. Dennoch wurde durch eine numerische Untersuchung auch eine asymmetrische Lösung der nichtlinearen Randwertaufgabe gefunden. Eine solche asymmetrische Lösung, die einer menschlichen Bewegung ähnlich erscheint, ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

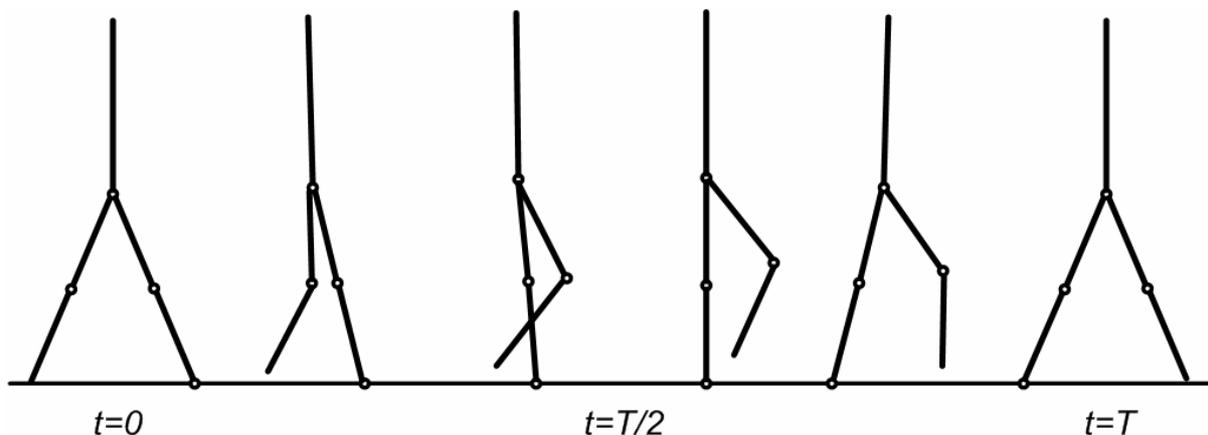


Abb. 4.11 – Asymmetrische Lösung der nichtlinearen Randwertaufgabe

Aus Eigenschaft 4 folgt, dass die Funktion $q(t)=-q(T-t)$ ebenfalls eine Lösung der Randwertaufgabe ist. Diese Lösung entspricht dabei einer Rückwärtsbewegung des Roboters. Aus den dargestellten Eigenschaften ist ersichtlich, dass die nichtlineare Randwertaufgabe mehrere Lösungen enthalten kann. Einige dieser Lösungen weisen dabei gewisse Ähnlichkeit zur menschlichen Bewegung auf und können anhand weiterer Bedingungen näher untersucht werden.

4.2.3 Zusammenfassung

Basierend auf der dargestellten Grundlagen der Generierung der ballistischen Trajektorien wurden in Rahmen der vorliegenden Arbeit zahlreiche Untersuchungen mit Robotermodellen unterschiedlicher Komplexität durchgeführt. Zur Untersuchung der grundlegenden Eigenschaften der Impulssteuerung wurde speziell auf ein einfaches Robotermodell mit lediglich fünf aktiven Freiheitsgraden zurückgegriffen. Obwohl das Robotermodell sehr einfach erscheint und Bewegung lediglich in einer vertikalen (sagittalen) Ebene erlaubt, bietet es die Möglichkeit, alle charakteristischen Eigenschaften der Impulssteuerung und der ballistischen Bewegung zu untersuchen und zu analysieren. Außerdem lässt ein solches Modell eine analytische Ableitung der Bewegungsgleichungen zu, was allerdings für Modelle mit einer höheren Anzahl von Freiheitsgraden wesentlich komplexer erscheint und lediglich symbolisch oder numerisch auf einem Rechner erfolgen kann. Da die resultierenden Trajektorien des vereinfachten Modells qualitativ mit entsprechenden Trajektorien eines Modells mit einer großen Anzahl von Freiheitsgrade übereinstimmen, werden im nachfolgenden Abschnitt die Trajektorien für ein komplexeres Modell detailliert beschrieben.

Bei der Analyse der ballistischen Trajektorien wurde eine große Ähnlichkeit der generierten Bewegungsabläufe sowie der dynamischen Eigenschaften mit der menschlichen Referenz festgestellt. So treten z.B. in einem Robotermodell mit Füßen qualitativ ähnliche Verläufe der Bodenreaktionskräfte auf wie beim normalen menschlichen Gehen.

Stufenweise wurde dann die Komplexität der Robotermodelle wesentlich erhöht. So wurde beim Übergang von der Bewegung in der Ebene zur Bewegung im dreidimensionalen Raum die Anzahl der Freiheitsgrade im Robotersystem gesteigert. In mehreren simulativen Experimenten wurde eine schlechte Konvergenz mit steigender Anzahl der Freiheitsgrade festgestellt. Es erwies als sehr schwierig bei mehr als zehn Freiheitsgraden eine plausible Lösung für das System zu finden. Dieses Problem ist durch eine steigende Dimension des Suchraumes zu begründen. Im nachfolgenden Abschnitt ist ein Ansatz zur Lösung dieses Problems vorgeschlagen und verifiziert.

Die Methode der Generierung von ballistischen Trajektorien wurde anhand des verallgemeinerten Robotermodells dargestellt. Unter mathematischer Anwendung einer Impulssteuerung wird für die Durchführung der gewünschten Bewegung dem Mechanismus im Startzeitpunkt die notwendige Energie impulsförmig hinzugefügt. Die Analyse der mathematischen Modellierung der Bewegungsabläufe für zweibeinige Roboter zeigt eine große Ähnlichkeit zum natürlichen Bewegungsmuster des Menschen.

Durch die Wahl der Impulssteuerung wird die mathematische Untersuchung des Systems erheblich vereinfacht und verleiht dem System wichtige Eigenschaften wie Gleichmäßigkeit und Effizienz der Trajektorien.

4.3 Generierung einer ballistischen Bewegung für komplexe mechanische Systeme

Mehrbeinige und zweibeinige mobile Roboter besitzen in der Regel mehrere aktiv gesteuerte Gelenke und demzufolge eine große Anzahl an Freiheitsgraden. So besitzt der in Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte zweibeiniger Roboter ROTTO in der aktuellen Ausbaustufe insgesamt zwölf gesteuerte Gelenke und dementsprechend zwölf aktive Freiheitsgrade. Zusammen mit sechs zusätzlichen ungesteuerten Freiheitsgraden, die die translatorische bzw. rotatorische Bewegung des Roboterkörpers in Bezug auf die Oberfläche darstellen, enthält das System insgesamt achtzehn Freiheitsgrade. Im Ergebnis beinhaltet das System 36 Zustandsvariablen und zwölf Stellsignale. Weiterhin ist die Dynamik der Bewegung in hohem Maße nichtlinear und stark verkoppelt, so dass die Berechnung der Steuerungseingriffe, die zu dem gewünschten Zustand des Roboters führen, eine anspruchsvolle Aufgabe darstellt. Es ist offensichtlich, dass das Standardverfahren der dynamischen Programmierung angesichts der Größe des Zustandsraums keine zufriedenstellende Lösung bietet. Wird z.B. der Schritt des Roboters in lediglich zehn Abschnitte unterteilt und wird die Ableitungen als Differenzen beschrieben, expandiert der Suchraum für alle Stellsignale auf 10^{12} für jeden Zeitabschnitt.

Im nachfolgenden Unterkapitel wird ein Verfahren zum Finden der optimalen Bewegungstrajektorien für komplexe mechatronische Systeme am Beispiel des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO vorgeschlagen und analysiert.

4.3.1 Definition der Randbedingungen

Als Untersuchungsobjekt wird ein Modell des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO mit insgesamt zwölf aktiven Freiheitsgraden ausgewählt. Um eine möglichst präzise Berechnung zu ermöglichen, wurde das Robotermodell zunächst sehr detailliert in einem CAD-Tool nachgebaut. Details dazu sind in Kapitel 2 dargelegt. Alle für die Simulation erforderlichen Parameter wie Längen, Massen und Massenverteilung der Bauteile wurden auf dieser Weise mit dem CAD-Tool bestimmt. In Abbildung 4.12 ist das Modell des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO dargestellt.

Trotz aller Versuche ein möglichst präzises Modell für die Simulation zu erstellen, weichen die Parameter des realen Roboters von jeweiligen Modellparametern erheblich ab. So kann z. B. bei einem Experiment ein idealer Kontakt mit dem Boden auf keiner Weise gewährleistet werden. Da die Genauigkeit und Abweichung der Parameter eine tiefgreifende Auswirkung auf die Stabilität des Roboters hat, muss in der Regel ein zusätzliches System für die Erhaltung des Gleichgewichts des Roboters sorgen. Dem Aufbau dieses Systems widmet sich das nächste Kapitel.

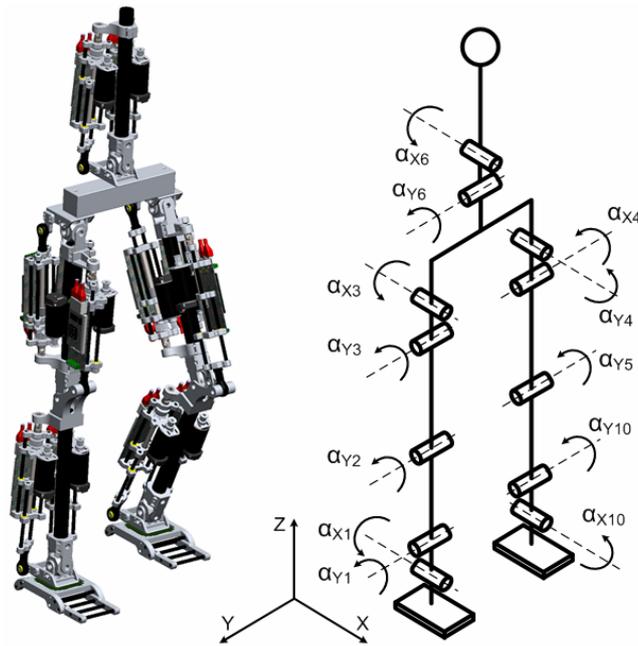


Abb. 4.12 – Modell des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf einer verallgemeinerten Lösung der Aufgabe der Generierung der Bewegungsabläufe für mobile Roboter. Aus diesem Grund werden hier die Untersuchungen lediglich für einen Schritt des Roboters dargestellt. Es ist offensichtlich, dass eine kontinuierliche Fortbewegung des Roboters durch konsequente Abarbeitung mehrerer solcher Schritte möglich ist.

4.3.2 Auswahl eines hierarchischen Modellsystems

Im Folgenden wird der Algorithmus beschrieben, der während der Untersuchungen des Robotermodells erarbeitet wurde. Der Algorithmus besteht aus mehreren Schritten, in denen jeweils ein erweitertes Modell eingeführt wird. Die Reihenfolge des hierarchischen Modellsystems spielt dabei eine wesentliche Rolle für die Konvergenz des Suchverfahrens bei der Generierung der ballistischen Bewegung. Als allgemeine Regel soll dabei die grobe Unterteilung der Komponenten des Roboters auf wesentliche Teile mit dem größten Gewicht gelten. In mehreren Schritten des Optimierungsverfahrens werden diese Komponenten stufenweise detailliert.

Schritt 1: Anpassung von Richtung und Geschwindigkeit der Bewegung

	<p>5 DoF ZX-Ebene</p>	<p>Berechnung einer Lösung mit der Kniebeugung nach vorne; Optimierung der Beinlänge in Abhängigkeit von Schrittdauer</p>
--	---------------------------	---

Schritt 2: Generierung des Schrittes in einer Ebene

	<p>5 DoF ZX-Ebene</p>	<p>Optimierung der Schrittlänge; durch die stufenweise Erhöhung der Schrittlänge wird die gewünschte Schrittlänge erreicht</p>
--	---------------------------	--

Schritt 3: Anpassung der Körperneigung

	<p>5 DoF ZX-Ebene</p>	<p>Die gewünschte Neigung des Körpers wird durch stufenweise Erhöhung der Körperneigung gefunden</p>
--	---------------------------	--

Schritt 4: Erweiterung auf eine Raumbewegung

	<p>5 DoF +2 DoF X-Achse in Hüfte 3D-Step</p>	<p>Durch zusätzliche Freiheitsgrade in den Hüftgelenken wird eine dreidimensionale Bewegung ermöglicht und optimiert</p>
--	--	--

Schritt 5: Erweiterung des Modells um 2 Freiheitsgrade im Hüftgelenk

	<p>7 DoF +2 DoF Z-Achse in Hüfte 3D-Step</p>	<p>Zusätzliche Freiheitsgrade (vertikale Rotation) in den Hüftgelenken ermöglichen weitere Optimierung der Bewegung</p>
--	--	---

Schritt 6: Erweiterung des Modells um ein Freiheitsgrad im Körper

	<p>9 DoF +1 DoF Z-Achse in Körper 3D-Step</p>	<p>Ein zusätzlicher Freiheitsgrad (vertikale Rotation) im Roboterkörper ermöglicht die Kompensation bohrender Drehmomente</p>
--	---	---

Schritt 7: Erweiterung des Modells um zwei Arme

	<p>10 DoF +4 DoF XY-Achse in Armen 3D-Step</p>	<p>Zusätzliche Freiheitsgrade der Arme (Schultergelenk) ermöglichen die weitere Optimierung der Kompensation bohrender Drehmomente</p>
--	--	--

Schritt 8: Erweiterung des Modells um zwei Füße

	<p>14 DoF +3 DoF XY-Achse in Füßen 3D-Step</p>	<p>Abschließend werden Füße und Fußgelenke hinzugefügt und deren Bewegung optimiert; wegen des geringen Gewichts sollen die Füße erst am Ende des Suchverfahrens hinzugefügt werden</p>
--	--	---

Der dargestellte Algorithmus wurde in zahlreichen Versuchen erarbeitet und basiert auf der Beobachtung und Analyse der Bewegungstrajektorien. Auf diese Weise wurden die ballistischen Trajektorien für einen komplexen Mechanismus mit mehreren Freiheitsgraden gefunden, was bei einer direkten Suche in mehrdimensionalem Raum praktisch unmöglich erscheint.

4.3.3 Lösung der ballistischen Aufgabe für komplexe mechanische Systeme

Die Lösung der Aufgabe der Generierung der ballistischen Raumbewegungen für komplexe mechanische Systeme wird beispielhaft für einen Schritt des zweibeinigen mobilen Roboters

erläutert. Wie bereits in diesem Kapitel geschildert wurde, ist eine direkte Suche nach der Lösung der ballistischen Randwertaufgabe bei einem komplexen System mit mehreren Freiheitsgraden oft unmöglich. Die Untersuchungen haben dennoch gezeigt, dass die Lösung für ein einfaches System z.B. mit fünf Freiheitsgraden sehr schnell numerisch oder für ein linearisiertes System, sogar analytisch gefunden werden kann.

Der in Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Ansatz beruht auf der Beobachtung und Analyse der Bewegungsabläufe des Menschen und besteht in konsequenter, schrittweiser Erhöhung der Freiheitsgrade des Systems.

Ausgangspunkt für die Untersuchung eines komplexen mechanischen Modells ist ein einfaches Modell des Mechanismus in einer Sagittalebene. Dafür wird ein komplettes Modell des zweibeinigen Roboters ROTTO mit insgesamt zwölf Freiheitsgraden anhand von CAD-Daten erstellt. In diesem Modell werden zunächst sieben der zwölf Freiheitsgrade blockiert, um ein entsprechendes vereinfachtes Modell des Roboters in der Sagittalebene zu erhalten. Die Freischaltung der blockierten Freiheitsgrade erfolgt in einer bestimmten Reihenfolge nach dem beschriebenen Algorithmus. Entsprechend der oben beschriebenen Aufgabenstellung zur Bestimmung der ballistischen Trajektorien werden für dieses mechanische System gewünschte Anfangs- und Endkonfiguration gewählt. Die Anfangsgeschwindigkeiten in den Gelenken werden zu Null gesetzt.

Als Lösung der Randwertaufgabe für das vereinfachte mechanische System mit fünf Freiheitsgraden werden die Trajektorien gefunden, die der ballistischen Bewegung des Mechanismus entsprechen. Diese Trajektorien sind in Abbildung 4.13 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass es sich um eine symmetrische Lösung handelt.

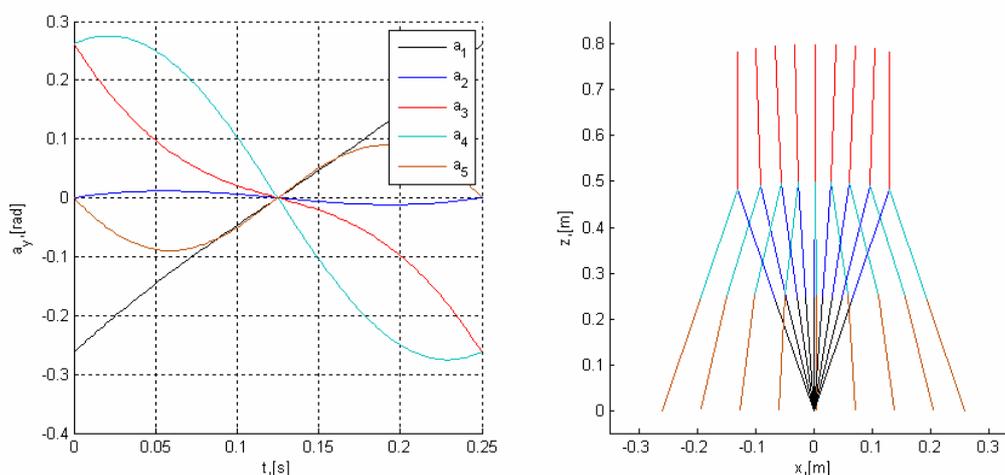


Abb. 4.13 – Symmetrische Lösung der Randwertaufgabe für das Modell mit fünf Freiheitsgraden

Die symmetrische Lösung ist jedoch unerwünscht, da die gefundene Bewegung der menschlichen Bewegung nicht ähnlich ist (s. Abb. 4.10). Um eine asymmetrische Lösung zu finden, muss sich die Anfangsgeschwindigkeit des Kniegelenks von der gefundenen Geschwindigkeit der symmetrischen Lösung wesentlich unterscheiden. Das Ergebnis soll die oben beschriebene Eigenschaft 4 der ballistischen Bewegung erfüllen, d.h. $q(t) = -q(T-t)$ muss gelten.

Die auf diese Weise gefundenen asymmetrischen Lösungen sind in Abb. 4.14 und Abb. 4.15 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass eine dieser Lösungen die Bewegung mit der Kniebeugung nach vorne (Abb. 4.14) und die andere die Bewegung mit der Kniebeugung nach hinten (Abb. 4.15) widerspiegelt. Da die Bewegung mit der Kniebeugung nach vorne einer menschlichen Bewegung ähnlich ist, wird diese für die nachfolgenden Untersuchungen verwendet.

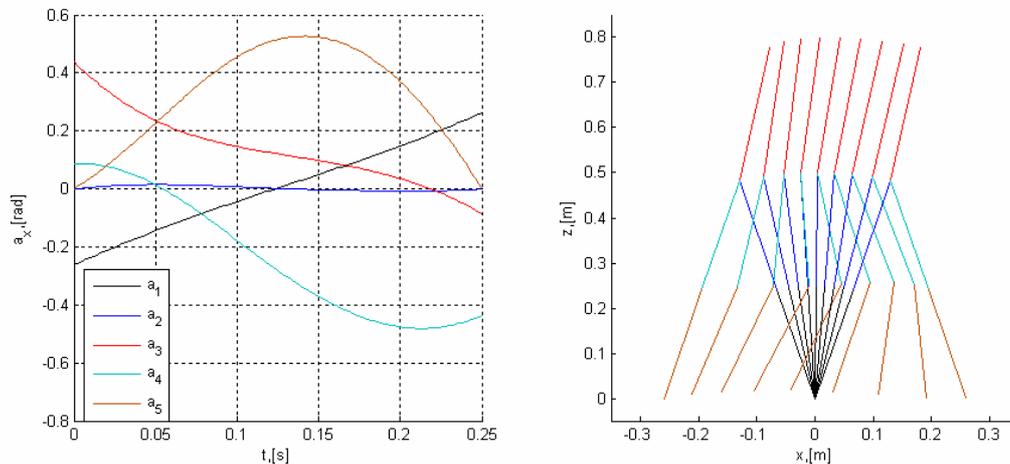


Abb. 4.14 – Asymmetrische Lösung der Randwertaufgabe; Bewegung mit der Kniebeugung nach vorne

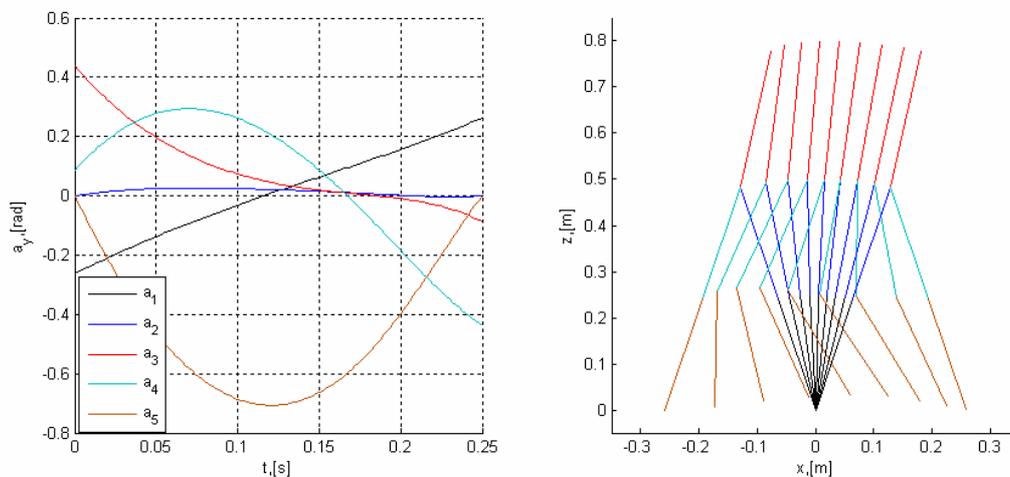


Abb. 4.15 – Asymmetrische Lösung der Randwertaufgabe; Bewegung mit der Kniebeugung nach hinten

Ballistische Bewegung in dreidimensionalem Raum

Nach der Analyse des vereinfachten Robotermodells in der ZY-Ebene wird das Model auf den dreidimensionalen Raum erweitert. Dabei werden dem Hüftgelenk zwei zusätzlichen Freiheitsgrade (X-Achse) hinzugefügt. Die resultierenden ballistischen Trajektorien sind in Abbildung 4.16 dargestellt.

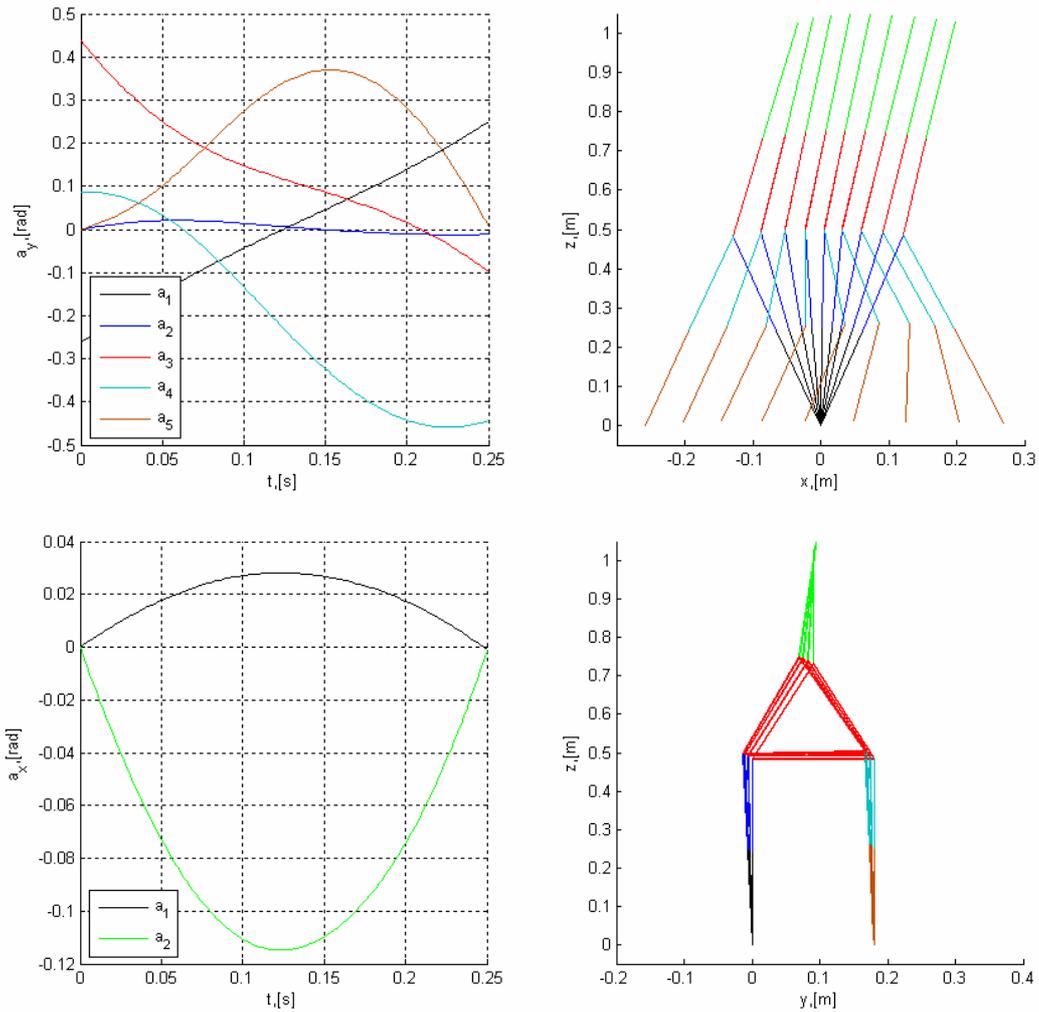


Abb. 4.16 – Ballistische 3D-Bewegung des Roboters mit einem zusätzlichen Freiheitsgrad im Hüftgelenk

Aus Trajektorien und dem kinematischen Diagramm ist ersichtlich, dass das Modell eine translatorische Vorwärtsbewegung und eine schwankende Bewegung in der Sagittalebene durchführt. Die resultierende ballistische Bewegung weist eine große Ähnlichkeit mit der menschlichen Bewegung auf, jedoch ist diese mehr gestreckt.

Die nächste Erweiterung des Modells erfolgt durch die Ergänzung um zwei weitere Freiheitsgrade im Hüftgelenk, die die Rotation der Beine um die vertikale Z-Achse (Weltkoordinatensystem) ermöglichen.

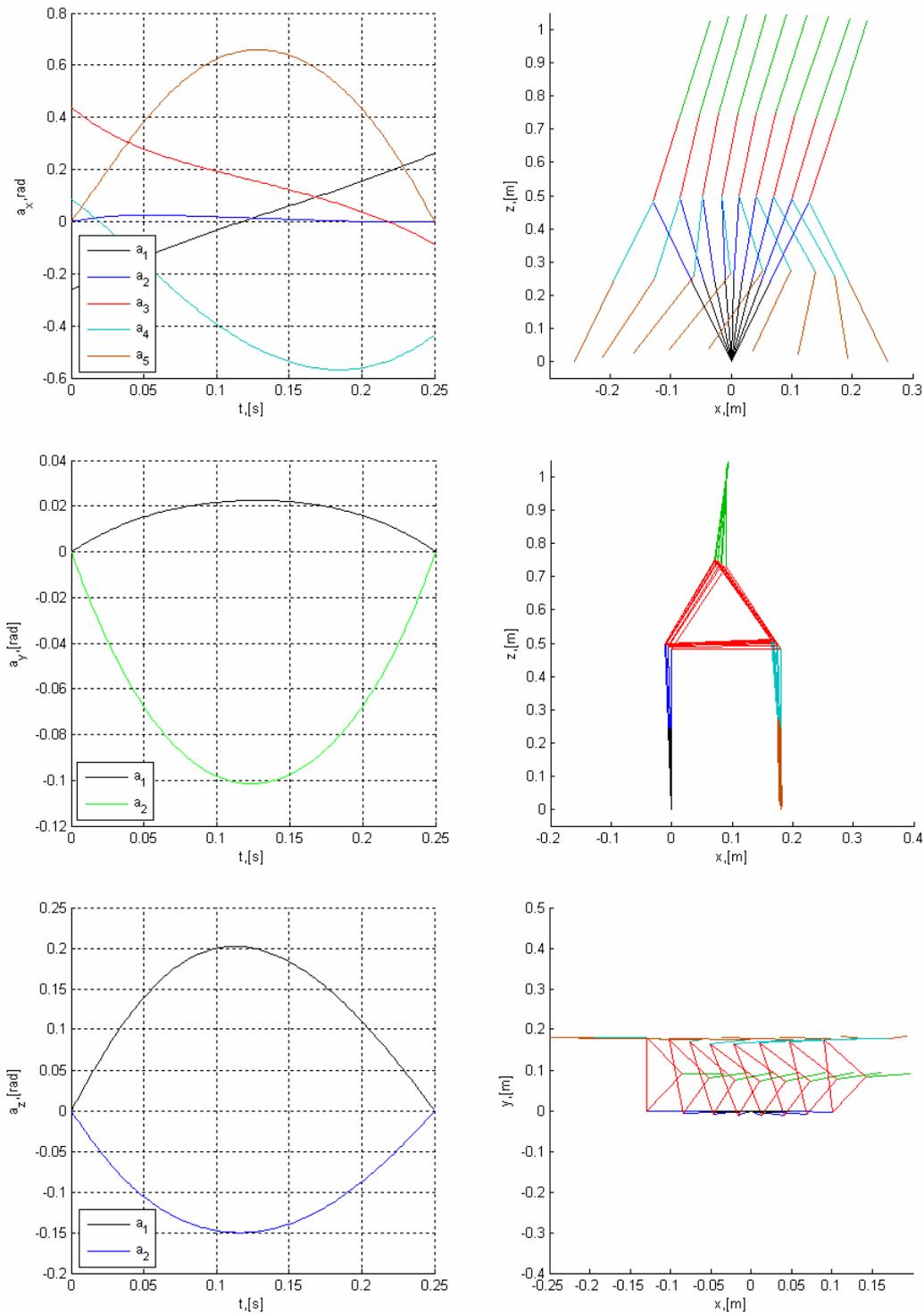


Abb. 4.17 – Ballistische 3D-Bewegung des Roboters mit zwei Freiheitsgraden in der Sagittalebene

Abbildung 4.17 zeigt die resultierende Trajektorien der Gelenke und die entsprechende Bewegungsdiagramme. Die Rotationsbewegung des Beckens des Roboters um die vertikale Z-Achse und die kompensierende Bewegung des Oberkörpers weisen dabei eine beträchtliche Ähnlichkeit der menschlichen Bewegung auf.

In abschließenden Schritten wird das Modell um Schultergelenke, Arme und einen weiteren Freiheitsgrad um die Z-Achse im Weltkoordinatensystem erweitert und enthält damit

insgesamt zwölf Freiheitsgrade. Die resultierende Trajektorien aller Gelenke des Roboters und die entsprechende Bewegungsdiagramme sind in Abbildung 4.18 dargestellt.

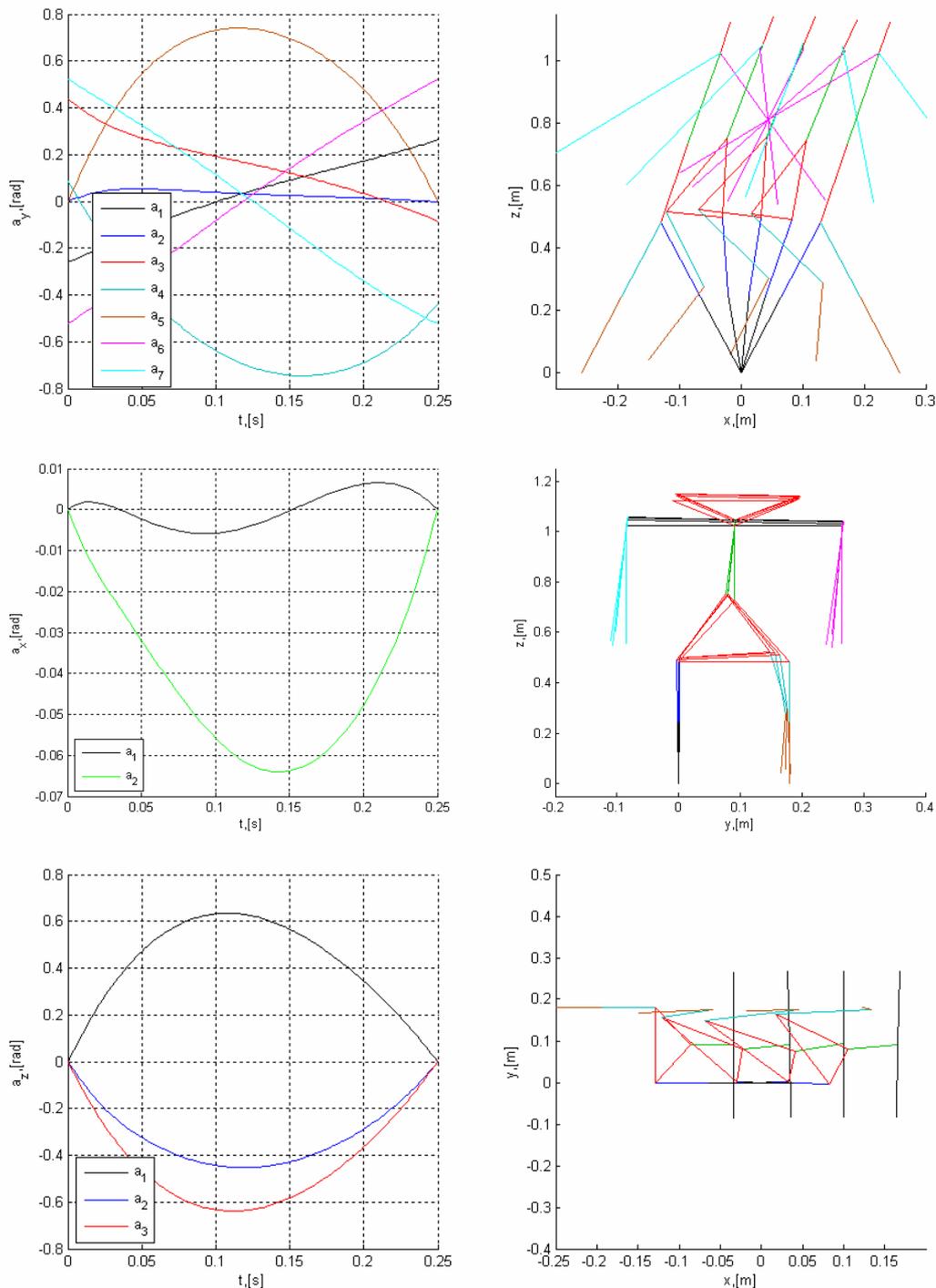


Abb. 4.18 – Ballistische 3D-Bewegung des Roboters mit zwölf Freiheitsgraden

Die resultierenden Trajektorien können als Referenz für die Steuerung des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO verwendet werden. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese Trajektorien eine freie ballistische Bewegung des mechanischen Systems darstellen und dass diese Trajektorien mit Hilfe von idealisierter Impulssteuerung ermittelt werden.

4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein direktes Verfahren zur Generierung der Bewegung für komplexe Robotersysteme präsentiert. Anhand eines simplen Modells wurden zunächst die Grundlagen der Berechnung ballistischer Raumbewegung beschrieben und untersucht. Allgemein werden zwei nacheinander folgenden Phasen der Bewegung betrachtet. Jede Einzelstützphase der Bewegung endet mit dem Anstoß des vorschwingenden Beins auf den Untergrund. Während der darauf folgenden Doppelstützphase findet ein Wechsel des Stützbeines statt. Diese Phase ist sehr kurz und wird als die momentane betrachtet. Mit einer neuen Einzelstützphase wird der nächste Bewegungsschritt angefangen. Aufgrund der Abwesenheit der ansteuernden Kräfte bzw. Drehmomente während der Bewegung wird diese als freie „ballistische“ Bewegung betrachtet. Die ansteuernden Drehmomente werden lediglich während der Doppelstützphase an die Robotergelenke angelegt und mathematisch in Form von impulsiver Einwirkung (Delta-Funktion) beschrieben. Zu diesem Zeitpunkt werden die Gelenkgeschwindigkeiten sprunghaft geändert. Auf die Fragestellung der Generierung der ballistischen Raumbewegung wurde als Lösung der Randwertaufgabe für ein Gleichungssystem, das den Roboter während der Einzelstützphase darstellt, eingegangen. Diese Aufgabe wird für komplexe mechanische Systeme am Beispiel eines zweibeinigen mobilen Roboters erweitert und mit dem vorgeschlagenen Verfahren numerisch gelöst.

Die resultierenden Trajektorien haben große Ähnlichkeit mit der Bewegung des Menschen. Dennoch wurden diese Trajektorien lediglich für ein mechanisches System berechnet und sind für eine direkte Umsetzung in einem zweibeinigen mobilen Roboter nur bedingt geeignet. Da der zweibeinige mobile Roboter ROTTO mit Hilfe von elektrischen Antrieben bewegt wird, muss bei der Berechnung der ballistischen Trajektorien das Trägheitsmoment der Antriebe berücksichtigt werden. Kapitel 6 stellt die simulative und experimentelle Ergebnisse einer solchen Aufgabenstellung für den realen Prototyp des zweibeinigen mobilen Roboters dar.

Die oben beschriebene Generierung ballistischen Trajektorien weist weitere Optimierungspotenziale mit der Einführung von verschiedenen Gütefunktionen auf. Als Gütefunktionen können in diesem Fall z. B. minimale Gelenkdrehmomente oder eine minimale kinetische Energie genannt werden. Diese Optimierungsschritte liegen außerhalb des Rahmens der vorliegenden Arbeit. Die Generierung der ballistischen Bewegung für mobilen Roboter ANTON wurde ebenfalls nicht weiter untersucht. Es ist dennoch denkbar, dass für den sechsbeinigen mobilen Roboter ANTON das System unter Verwendung ähnlicher Techniken aufgebaut werden kann.

Kapitel 5

Gleichgewichtserhaltung

Allgemein betrachtet unterscheidet sich die Problematik der Gang- bzw. Trajektorienplanung für zweibeinige mobile Roboter grundlegend von der Trajektorienplanung für konventionelle Industrieroboter. Ein wesentlicher Unterschied liegt in der Art der Kraftwechselwirkung zwischen der Umgebung und dem Roboter. Ein zweibeiniger Roboter kann daher als ein frei beweglicher Mechanismus betrachtet werden, der lediglich über seine Füße auf die Umgebung einwirkt. In diesem Fall handelt es sich um eine einseitige Krafteinwirkung, da die Roboterfüße keine Zugkraft im Bezug auf den Untergrund erzeugen können. Dagegen sind Industrieroboter in der Regel mittels einer Befestigungsplattform fest mit dem Untergrund verbunden. Im Kontaktpunkt zwischen dem Fuß des zweibeinigen Roboters und Untergrund entstehen außerdem ungesteuerten Freiheitsgrade, in denen kein aktives Drehmoment agieren kann. Eine inkorrekte oder ungenügende Behandlung dieser Eigenschaft führt sehr schnell zum Gleichgewichtsverlust.

Die Aufgabe der Stabilitäts-erhaltung ist eng mit der Einhaltung des Gleichgewichts des Fußes verbunden. Der Roboter befindet sich im Gleichgewicht und das Bewegungsmuster wird als statisch stabil betrachtet, wenn während der Bewegung die Projektion des Massenmittelpunktes (engl. Ground projection of Center of Mass - GCoM) auf den Untergrund innerhalb der Stützfläche der Füße liegt. Sollte die GCoM die Stützfläche der Füße verlassen, so existiert ein nicht kompensiertes Drehmoment, das das Kippen des Roboters um den Fußrand hervorruft.

Durch konstruktive Besonderheiten sind zweibeinige Roboter auf wesentlich kleinere Stützflächen als mehrbeinige Roboter angewiesen. Einerseits bietet diese Eigenschaft wichtige Vorteile wie erhöhte Beweglichkeit und Bodenpassierbarkeit. Andererseits bewirkt diese gemeinsam mit der hohen Lage des Massenmittelpunktes des zweibeinigen Roboters eine wesentliche Komplexität der Regelung für die Erhaltung der Stabilität.

Obwohl der Verlust der Stabilität durch die Überwachung und Steuerung des Gleichgewichts des Roboterfußes erfasst werden kann, ist die eigentliche Stabilisierung durch den Mangel der Definition der Stabilität der Roboterbewegung erschwert. Wie bereits dargestellt wurde, kann statische Stabilität mittels GCoM genau definiert werden. Dynamische Stabilität wird dagegen oft als Fehlen von statischer Stabilität betrachtet. Weiterhin wurden andere, speziell auf die Roboterbewegung bezogene Definitionen, vorgeschlagen. Basierend auf einem wiederholbaren Bewegungsmuster wird z. B. die orbitale Stabilität definiert.

Es wird über eine sogenannte Körperstabilität gesprochen, wenn sich die Körperlage lediglich in einem begrenzten Umfang ändern darf und nach einer Störung wieder in die Anfangsposition zurückkehrt. Ähnlich garantiert die sogenannte Körperbahnstabilität die Rückkehr des Roboterkörpers zur mittleren Ursprungsgeschwindigkeit nach einer Störung. Eine stationäre Gangstabilität erfordert die Einhaltung bestimmter charakteristischer Gangeigenschaften als Parametervektor innerhalb ausgewählter Randbedingungen.

Durch eine Kombination aus nacheinander folgenden Einzelstütz- bzw. Doppelstützzustände, kann ein dynamisch stabiler Bewegungszyklus erreicht werden. Es ist allerdings zu beachten, dass keiner von diesen Zuständen einen stabilen Gleichgewichtszustand des Roboters darstellt. Dementsprechend ist das Gehen ein grundsätzlich instabiler Prozess, während dessen sich der Roboter permanent in einem Zustand unmittelbar vor dem Fallen befindet. Eine korrekte Auswahl der Zustandsübergänge verhindert dabei effizient das Fallen. Diese Eigenschaft zweibeiniger Roboter ist durch existierende Randbedingungen der Ansteuerbarkeit und einem beträchtlichen Trägheitsmoment während des Gehens begründet, was unter anderem auch die Notwendigkeit der konsekutiven Beschleunigung bzw. Abbremsung des Roboters beim Starten und Stoppen der Gehbewegung bedeutet.

Zu den bekanntesten Konzepten der Stabilisierung und Erhaltung des Gleichgewichts bei Menschen gehören im Allgemeinen drei grundlegenden Ansätze.

Der erste Ansatz basiert auf der Definition eines Nulldrehmomentpunktes (englisch: Zero-Moment-Point – ZMP) und verwendet aktive Drehmomente im Fußgelenk um die notwendige Kraft auf den Massenmittelpunkt des Roboters zu erzeugen.

Eine weitere Möglichkeit der Stabilisierung und Erhaltung des Gleichgewichts besteht in der Veränderung oder Verlagerung der Stützfläche durch die Anpassung der Schrittparameter.

Eine Besonderheit des dritten Ansatzes liegt darin, eine kontrollierte Bewegung des Körpers oder auch anderer nicht im Kontakt mit dem Boden befindlichen Gliedmaßen zu verwenden, um einen Drehimpuls um den Massenmittelpunkt zu erzeugen.

Jeder dieser Ansätze beeinflusst die horizontale Position (in transversaler Ebene) des Massenmittelpunktes durch die gezielte Veränderung der horizontalen Komponenten der Bodenreaktionskräfte. Diese Komponenten der Bodenreaktionskräfte entstehen durch die Kraftwechselwirkung zwischen dem Stützfuß und dem Boden und sind außerdem die einzigen externen Kräfte, die auf Robotersystem einwirken. Eine angemessene Bodenreaktionskraft kann somit die gezielte Beschleunigung des Massenmittelpunktes in eine gewünschte Richtung ermöglichen. Die Fähigkeit des Roboters, den Massenmittelpunkt zu beschleunigen, ist jedoch durch die erhebliche Massenträgheit des Systems sowie das eingeschränkte Vermögen ausreichend große Reaktionskräfte zu erzeugen, begrenzt.

5.1 Bodenbezugspunkte in der Roboterbewegung

Die meisten existierenden Methoden zur Stabilisierung der Körperhaltung und Bewegung von mobilen Robotern beruhen auf klassischen Definitionen der Mechanik und Dynamik wie das d'Alembertsche Prinzip und die Bewegungsgleichungen nach Newton-Euler oder Lagrange und setzen die Existenz bestimmter Bezugspunkte auf dem Boden voraus. Anhand dieser Bodenbezugspunkte können weitere Aussagen bezüglich des statischen und dynamischen Verhaltens des Robotersystems gemacht werden.

Der Nulldrehmomentpunkt wurde zum ersten Mal im Jahr 1938 von Elftman [137] bei der Untersuchung menschlicher Biomechanik vorgestellt und wurde aber erst wesentlich später im Kontext zweibeiniger Roboter [1, 4, 5, 84, 106, 136] verwendet.

Zusätzlich zu dem ZMP hat Goswami 1999 [71] den Fußdrehindikator (englisch: Foot-Rotation-Indicator – FRI) eingeführt, nämlich den Punkt auf der Kontaktfläche, der die Information zur Drehbeschleunigung des Stützfußes in der Einstützphase liefert.

Obwohl die CoM-Position für die Detektierung der Fußdrehung bei einem stationären Roboter mit einem Stützpunkt ausreichend ist, ist diese Information bei einem beweglichen Roboter ungenügend. Stattdessen zeigt die Position des FRI die Existenz eines unbalancierten Drehmomentes im Fuß. Der FRI ist der Punkt auf der Kontaktfläche innerhalb bzw. außerhalb des Stützpolygons, wo die Reaktionskraft dem Roboter kein Kippdrehmoment mehr verleiht. Je weiter entfernt sich dieser Punkt vom Stützpolygon befindet, desto größer ist das unbalancierte Drehmoment und desto größer ist auch die Instabilität des Roboters. Um die Fußdrehung zu vermeiden, sollte der FRI innerhalb des Stützpolygons bleiben, unabhängig von der CoM-Position. Der FRI ist ein dynamisches Kriterium, das sich im stationären Fall zu GCoM reduziert.

Der Druckzenterpunkt (englisch: Center of Pressure – CoP) ist den Punkt auf der Kontaktfläche, in der die Reaktionskraft aktuell wirkt. Unabhängig von der Stabilität des Roboters, verlässt das CoP nie das Stützpolygon, wobei der FRI das im Falle eines unbalanciertes Fußdrehmomentes macht. Tatsächlich zeigt der Abstand des FRI-Punktes vom Stützpolygon das Ausmaß dieses unbalanciertes Drehmomentes und kann in der Planungsphase berücksichtigt werden.

Das Gelenk des Massenmittelpunktdrehmomentes (englisch: Centroidal Moment Pivot – CMP) ist ein anderer Referenzpunkt der Roboterbewegung und wurde kürzlich in der Fachliteratur vorgestellt [138-140]. Falls der CMP mit dem ZMP übereinstimmt, wirkt die Reaktionskraft direkt in Richtung des Massenmittelpunktes des Roboters und erfüllt die Bedingungen des Nulldrehmomentes bzw. des Drehgleichgewichtes. Demzufolge bedeutet die Abwanderung des CMP vom ZMP das Vorhandensein eines Drehmomentes auf dem CoM, das die Änderung im Drehmoment des Körpers indiziert.

Im folgenden Kapitel werden die ZMP, FRI und CMP Bodenreferenzpunkte näher untersucht. Bei Verwendung konsequenter mathematischer Beschreibungen werden in Rahmen vorliegender Arbeit die Bodenreferenzpunkte definiert und verglichen sowie verschiedene Methoden zu deren Abschätzung gezeigt.

5.1.1 Zero Moment Point

Herkömmliche zweibeinige mobile Roboter erreichen die Stabilität ihres Ganges durch eine Bahnsteuerung des gewünschten Druckpunktes auf der unteren Fußebene. Dies äußert sich im stabilen Gehen, solange Störungen nicht signifikant sind. Diese Methode ist als ZMP - Steuerungsmethode bekannt, da die ZMP-Position auf dem Untergrund gesteuert wird.

Der ZMP kann als ein Punkt auf dem Untergrund definiert werden, an dem das gesamte Drehmoment von Bodenreaktionskräften gleich Null ist [5]. Der ZMP kann, basierend auf den Roboterzustand und auf der Beschleunigung der Robotergerlenke, analytisch berechnet werden. Der ZMP ist äquivalent zum CoP, der direkt über die passenden Kraftsensoren im Roboterfuß gemessen wird. Obwohl ZMP und CoP äquivalent sind [34, 46, 71], wird der

Begriff ZMP im Falle der Berechnung anhand des Roboterzustandes und der Gelenkbeschleunigung verwendet, wobei sich der Begriff CoP auf dem mit den Kraftsensoren gemessenen äquivalenten Punkt bezieht. Um Verwirrungen zu vermeiden, wird im Folgenden der Begriff ZMP verwendet. Die detaillierte Beschreibung der analytischen Berechnung der ZMP Position sowie die Erfassung der ZMP Position mit Hilfe von Kraftsensoren im Roboterfuß ist im Abschnitt 5.1.2 dargelegt.

Für die Steuerung zweibeiniger Roboter wird die analytische ZMP-Berechnung zur Planung der Robotertrajektorien benutzt. Die Hauptannahmen dieser Methode sind: Der Stützfuß/die Stützfüße bleiben auf der Kontaktfläche und die Kontaktfläche ist eben. In diesem Fall können die Trajektorien so geplant werden, als ob der mobile Roboter ein stationärer Manipulator wäre. Das Hauptmerkmal ist dabei, das sich der Fuß nicht im perfekten Kontakt mit dem Untergrund befindet und unter Angriff zusätzlichen Kräfte einfach rutschen oder rollen kann. In der Tat kann der Fuß zu rollen beginnen, wenn sich der ZMP an der Kante des Stützpolygons befindet [71]. Die ZMP-Steuerungsmethode löst das Problem damit, dass die Referenztrajektorien immer die Position des ZMP innerhalb des Stützpolygons gewährleisten. Da die Trajektoriengenerierung rechnerisch sehr aufwändig ist, erfolgt diese gewöhnlich offline. Diese werden dann im steifen Regler abgearbeitet. Die Abweichungen von Referenztrajektorien werden zu deren Anpassung verwendet [1, 8].

Beim Aufbau einer auf ZMP-basierten Steuerungssystemen wird oft angenommen, dass das Anhalten des ZMP innerhalb des Stützpolygons ein ausreichendes Kriterium für die Gangstabilität ist [85]. Es sind jedoch die Situationen bekannt, in denen der Roboter umkippt und fällt, obwohl der ZMP im Zentrum des Stützpolygons gehalten wird. Wenn z. B. das Drehmoment im Fußgelenk permanent so angepasst wird, dass der Fuß flach zur Oberfläche bleibt und dementsprechend der ZMP innerhalb des Stützpolygons liegt, kann der Massenzentrum trotzdem den stabilen Bereich verlassen und das Umkippen des Roboters hervorrufen. In einem anderen Fall, kann z. B. eine unzureichende Ansteuerung der Gelenke (ähnlich der Muskellähmung beim Menschen) einen Zusammenbruch des Roboters bewirken, ohne dabei den Fuß oder die Füße von der flachen Position zu bewegen. Der ZMP bleibt dabei ebenfalls innerhalb des Stützpolygons liegen.

Der Druck unter dem stützenden Fuß kann durch eine Reaktionskraft ersetzt werden, die an einem bestimmten Punkt des Fußes ansetzt. Da die Summe aller Momente der aktiven Kräfte im Bezug auf diesen Punkt gleich Null ist, wird er der Punkt der Nullmomente (ZMP) genannt [8]. Um das dynamische Gleichgewicht beizubehalten, sollte die Reaktionskraft F_R an einem passenden Punkt auf der Fußsohle ansetzen, um alle Kräfte auszugleichen, die während der Bewegung auf den Mechanismus wirken (Kräfte der Inertia, Gravitationskräfte, Coriolis- und Zentrifugalkräfte). Wenn das Koordinatensystem in den Punkt gesetzt wird, in dem die Kraft F_R einwirkt, ist es von den Gleichgewichtszuständen her eindeutig, dass die Momente, die über die horizontalen Achsen X und Z ansetzen, immer gleich Null sind, d. h. $M_x=0$ und $M_z=0$. Die einzige Komponente, die unausgeglichen bleiben kann, ist ein bohrendes Drehmoment M_y . Zur Vereinfachung der Darstellung wird hier angenommen, dass die Reibkonstante zwischen Boden und Fuß groß genug ist und M_y durch Reibungskräfte ausgeglichen wird. So verursacht das Drehmoment M_y keine Fußbewegung und keine Änderung in der Fußdynamik. Es ist jedoch zu bemerken, dass unter realen Bedingungen die Reibungskräfte nicht ausreichend sind, um ein bohrendes Drehmoment M_y auszugleichen. Zur Kompensation des bohrenden Drehmoments wird deswegen eine Gegenrotation des Roboterkörpers (oder Gegenbewegung der Arme) notwendig. Die Berücksichtigung dieser Eigenschaft in herkömmlichen Steuerungssystemen ist mit deutlichem Aufwand verbunden. Im Falle des im Kapitel 4 beschriebenen ballistischen Ansatzes wird jedoch das auftretende

bohrende Drehmoment im Fuß bereits bei der Generierung der Bewegungstrajektorien berücksichtigt.

5.1.2 Berechnung und Erfassung der ZMP Position

Wie bereits erwähnt wurde, kann der ZMP basierend auf den Roboterzustand und auf der Beschleunigung der Robotergelenke analytisch berechnet werden. Nach Definition des ZMP:

$$\vec{\tau}_{G.R}(\vec{r}_{ZMP})|_{horizontal} = 0 \quad (5.1)$$

Der ZMP kann auch als ein Punkt auf der Kontaktfläche definiert werden, an dem das gesamte Drehmoment von Trägheits- und Bodenreaktionskräfte keine horizontale Kraftkomponenten hat, wenn auf das System keine externe Kraft einwirkt.

$$\vec{\tau}_{inertial+gravity}(\vec{r}_{ZMP})|_{horizontal} = 0 \quad (5.2)$$

Das resultierende Drehmoment der Trägheits- und Gravitationskräfte entspricht im Gleichgewicht dem Gesamtdrehmoment im Massenmittelpunkt des mechanischen Systems. Für die Definition des ZMP (5.1) gilt:

$$\vec{\tau}(\vec{r}_{ZMP})|_{horizontal} = [(\vec{r}_{CM} - \vec{r}_{ZMP}) \times M\vec{g}], \quad (5.3)$$

wobei \vec{r}_{CM} – der Vektor-Radius des Massenmittelpunktes des mechanischen Systems im Bezug auf das Weltkoordinatensystem;

\vec{r}_{ZMP} – der Vektor-Radius der ZMP-Position des mechanischen Systems im Bezug auf ein Weltkoordinatensystem;

M – die Gesamtmasse des Systems;

\vec{g} – der Vektor der Schwerkraft, $\vec{g} = [0; 0; -g]$ ist.

Unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften aller Segmente des mechanischen Systems kann die Gleichung (5.3) auf folgender Weise geschrieben werden:

$$\sum_{i=1}^n [(\vec{r}_i - \vec{r}_{ZMP}) \times m_i \cdot (\vec{a}_i - \vec{g}) + I_i \cdot \vec{\alpha}_i] = [(\vec{r}_{CM} - \vec{r}_{ZMP}) \times Mg] \quad (5.4)$$

Für die Gleichung (5.4) unter Berücksichtigung der Definition von ZMP (5.2) gilt:

$$\sum_{i=1}^n [(\vec{r}_i - \vec{r}_{ZMP}) \times m_i \cdot (\vec{a}_i - \vec{g}) + I_i \cdot \vec{\alpha}_i] = 0 \quad (5.5)$$

Für jedes Segment des mechanischen Systems wird der Trägheitstensor in der Form einer Diagonalmatrix definiert:

$$I_i = \begin{bmatrix} I_{xx_i} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy_i} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz_i} \end{bmatrix}$$

Für ein Vektorprodukt gilt die Gleichung:

$$(A - B) \times C = A \times C - B \times C$$

Die Gleichung (5.5) nimmt dem entsprechend folgende Form an:

$$\sum_{i=1}^n \left[\vec{r}_i \times m_i \cdot (\vec{a}_i - \vec{g}) - \vec{r}_{ZMP} \times m_i \cdot (\vec{a}_i - \vec{g}) + I_i \cdot \ddot{\vec{\alpha}}_i \right] = 0 \quad (5.6)$$

Nach Anwendung des Vektorprodukts auf die Gleichung (5.6) ergibt sich:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \left[r_{iy} \cdot m_i \cdot (a_{iz} + g) - r_{iz} \cdot m_i \cdot (a_{iy} - 0) - r_{ZMPy} \cdot m_i \cdot (a_{iz} + g) + r_{ZMPz} \cdot m_i \cdot (a_{iy} - 0) + Ixx_i \cdot \ddot{\alpha}_{ix} \right] = 0 \\ \sum_{i=1}^n \left[r_{iz} \cdot m_i \cdot (a_{ix} - 0) - r_{ix} \cdot m_i \cdot (a_{iz} + g) - r_{ZMPz} \cdot m_i \cdot (a_{ix} - 0) + r_{ZMPx} \cdot m_i \cdot (a_{iz} + g) + Iyy_i \cdot \ddot{\alpha}_{iy} \right] = 0 \\ \sum_{i=1}^n \left[r_{ix} \cdot m_i \cdot (a_{iy} - 0) - r_{iy} \cdot m_i \cdot (a_{ix} - 0) - r_{ZMPx} \cdot m_i \cdot (a_{iy} - 0) + r_{ZMPzy} \cdot m_i \cdot (a_{ix} - 0) + Izz_i \cdot \ddot{\alpha}_{iy} \right] = 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

Nach Definition des ZMP ist $r_{ZMPz} = 0$, deswegen gilt für die Gleichung (5.7):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \left[r_{iy} \cdot m_i \cdot (a_{iz} + g) - r_{iz} \cdot m_i \cdot a_{iy} - r_{ZMPy} \cdot m_i \cdot (a_{iz} + g) + Ixx_i \cdot \ddot{\alpha}_{ix} \right] = 0 \\ \sum_{i=1}^n \left[r_{iz} \cdot m_i \cdot a_{ix} - r_{ix} \cdot m_i \cdot (a_{iz} + g) + r_{ZMPx} \cdot m_i \cdot (a_{iz} + g) + Iyy_i \cdot \ddot{\alpha}_{iy} \right] = 0 \\ \sum_{i=1}^n \left[r_{ix} \cdot m_i \cdot a_{iy} - r_{iy} \cdot m_i \cdot a_{ix} - r_{ZMPx} \cdot m_i \cdot a_{iy} + r_{ZMPzy} \cdot m_i \cdot a_{ix} + Izz_i \cdot \ddot{\alpha}_{iy} \right] = 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

Wenn das System (5.8) im Bezug auf r_{ZMPx} und r_{ZMPy} gelöst wird, kann die Position des ZMP ermittelt werden:

$$\begin{aligned} r_{ZMPx} &= - \sum_{i=1}^n \left[\frac{r_{iz} \cdot m_i \cdot a_{ix} - r_{ix} \cdot m_i \cdot (a_{iz} + g) + Iyy_i \cdot \ddot{\alpha}_{iy}}{m_i \cdot (a_{iz} + g)} \right] \\ r_{ZMPy} &= \sum_{i=1}^n \left[\frac{r_{iy} \cdot m_i \cdot (a_{iz} + g) - r_{iz} \cdot m_i \cdot a_{iy} + Ixx_i \cdot \ddot{\alpha}_{ix}}{m_i \cdot (a_{iz} + g)} \right] \end{aligned} \quad (5.9)$$

Die Position des Massenmittelpunktes kann mit Hilfe folgender Gleichungen definiert werden:

$$r_{CMx} = \frac{\sum_{i=1}^n rx_{CMi} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad r_{CMy} = \frac{\sum_{i=1}^n ry_{CMi} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad r_{CMz} = \frac{\sum_{i=1}^n rz_{CMi} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}. \quad (5.10)$$

Unter Berücksichtigung von (5.10) nimmt die Gleichung (5.9) folgende Form an:

$$\begin{aligned}
 r_{ZMPx} &= r_{CMx} - \sum_{i=1}^n \left[\frac{r_{iz} \cdot m_i \cdot a_{ix} + Iyy_i \cdot \ddot{\alpha}_{iy}}{m_i \cdot (a_{iz} + g)} \right] \\
 r_{ZMPy} &= r_{CMy} - \sum_{i=1}^n \left[\frac{r_{iz} \cdot m_i \cdot a_{iy} - Ixx_i \cdot \ddot{\alpha}_{ix}}{m_i \cdot (a_{iz} + g)} \right]
 \end{aligned}
 \tag{5.11}$$

Entsprechend der Definition kann der ZMP das Stützpolygon unter dem Roboter nicht verlassen. Die Verschiebung der Position des ZMP außerhalb des Stützpolygons bedeutet jedoch nicht den Verlust des Gleichgewichts, sondern ein unphysisches Verhalten des Systems.

Die aktuelle Position des ZMP kann berechnet werden, wenn z. B. detaillierte Informationen über die Dynamik einzelner Körpersegmente bereitsteht. Diese Methode ist jedoch auf eine präzise Messung der linearen Beschleunigungen aller Gliedmaßen des Roboters angewiesen und ist bei dem aktuellen Stand der Technik nur begrenzt möglich. Eine weitere Möglichkeit der Erfassung der ZMP-Position bietet die Vermessung von Bodenreaktionskräften. Dafür werden in Fuß oft integrierte Kraftsensoren verwendet. Die Methodik der Vermessung von Bodenreaktionskräften bei im Rahmen dieser Arbeit entwickelten mobilen Robotern wurde bereits im Kapitel 2 ausführlich dargelegt.

Eine einfache und dennoch effiziente Methode der Erfassung der ZMP Position stellt die Verwendung von drei bzw. vier in die Fußsohle integrierten Kraftmesszellen zur Bestimmung der vertikalen Komponenten der Reaktionskraft dar. In Abb. 5.1 ist die Anordnung der Kraftsensoren in der Fußsohle dargestellt.

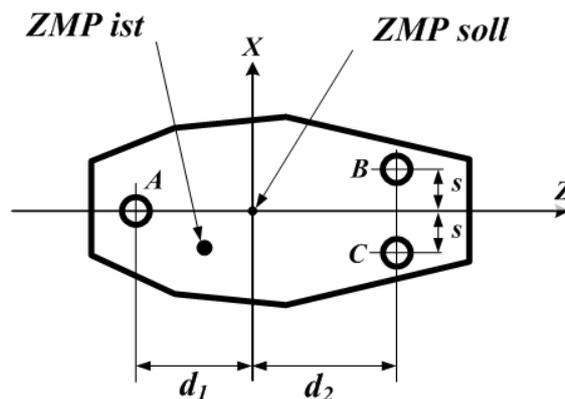


Abb. 5.1 Anordnung der Kraftsensoren in der Fußsohle des Roboters

Es wird ein Punkt O auf der Fußsohle ausgewählt, der der nominellen Position des ZMP entspricht, wie es in Abb. 5.1 gezeigt ist. Es wird ein Koordinatensystem mit dem Ursprung im Punkt O ausgewählt. Die von Kraftsensoren A, B und C gemessenen vertikalen Komponenten der Reaktionskräfte können auf folgender Weise beschrieben werden:

$$\begin{aligned}
 R_B \cdot s - R_C \cdot s &= 0 \\
 R_A \cdot d_1 - (R_B + R_C) \cdot d_2 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{5.12}$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned}
R_C &= R_B \\
R_A &= \frac{2d_2}{d_1} R_B
\end{aligned} \tag{5.13}$$

Die nominellen Werte der vertikalen Komponenten der Reaktionen, die der nominellen ZMP Position entsprechen, können somit durch die Abtastung der Sensoren ermittelt werden:

$$\begin{aligned}
R_B^0 &= \frac{R_Z}{2 \cdot \left(1 + \frac{d_2}{d_1}\right)} \\
R_C^0 &= \frac{R_Z}{2 \cdot \left(1 + \frac{d_2}{d_1}\right)} \\
R_A^0 &= \frac{d_2 \cdot R_Z}{d_1 \cdot \left(1 + \frac{d_2}{d_1}\right)}
\end{aligned} \tag{5.14}$$

wobei $R_Z = R_A + R_B + R_C$ die vertikale Komponente der gesamten Reaktionskraft in der Fußsohle ist.

Wenn die aktuelle Position des ZMP von ihrer nominellen Position abweicht, kann diese nach folgendem Zusammenhang ermittelt werden:

$$\begin{aligned}
s \cdot (\Delta R_B - \Delta R_C) &= \Delta M_{ZMP}^Z = R_Y \cdot \Delta X \\
d_1 \cdot (\Delta R_B - \Delta R_C) - d_2 \cdot \Delta R_A &= \Delta M_{ZMP}^X = R_Y \cdot \Delta Z
\end{aligned} \tag{5.15}$$

Hier sind Δx und Δz die Abweichungen der aktuellen ZMP Position und ΔR_A , ΔR_B und ΔR_C die Abweichungen der Reaktionen von ihren nominellen Werten.

Wie bereits im Kapitel 2 beschrieben, bietet die Verwendung von Mehrkomponenten Kraftsensoren im Roboterfuß wesentliche Vorteile durch die Erfassung zusätzlicher Information über die Eigenschaften des Fußkontaktes. So wird im zweibeinigen mobilen Roboter ROTTO ein Kraft-/Drehmomentsensor mit sechs Komponenten in jeden Fuß integriert. In Abb. 5.2 ist ein Konzept der Erfassung der Position des ZMP in einem Referenzkoordinatensystem dargestellt.

Die Position der gesamten Reaktionskraft kann auf folgende Weise bestimmt werden:

$$X_{G.R.} = \text{sign}(M_Z) \cdot \sqrt{\frac{M_Z^2}{F_X^2 + F_Y^2} - h^2} \tag{5.16}$$

$$Y_{G.R.} = \text{sign}(M_Z) \cdot \sqrt{\frac{M_X^2}{F_Y^2 + F_Z^2} - h^2}$$

$$Z_{G.R.} = OH.$$

wobei OH – die Höhe des Sensorkoordinatensystems im Bezug auf die Oberfläche ist.

Die aufgeführte Koordinatentransformation setzt voraus, dass der Fuß flach auf der Oberfläche liegt und das Sensorkoordinatensystem im Bezug auf Weltkoordinatensystem ungedreht bleibt.

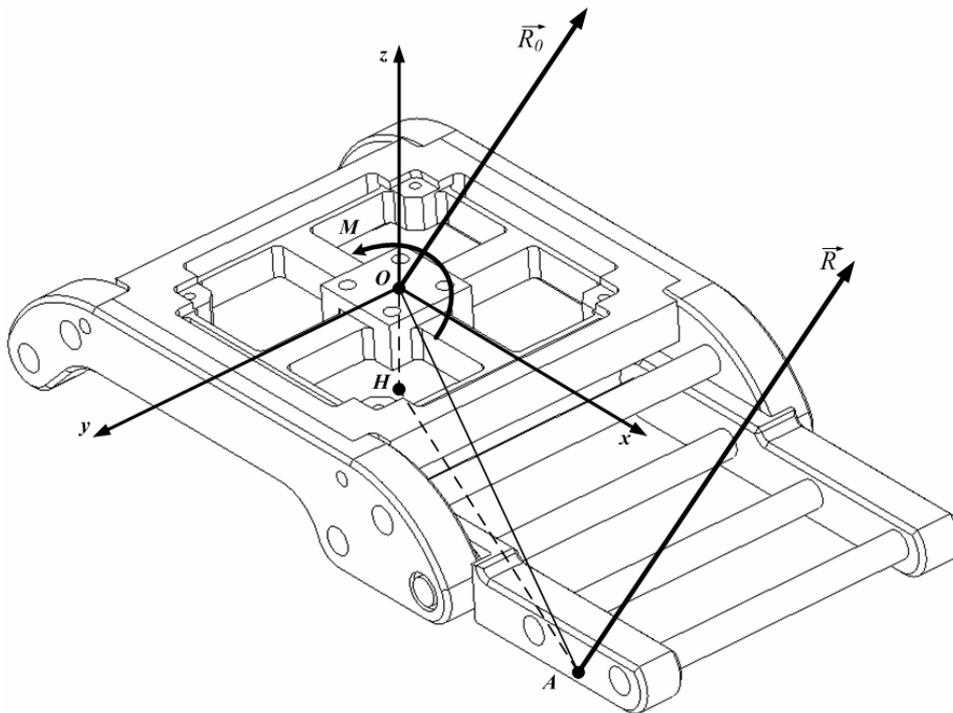


Abb. 5.2 - Erfassung der ZMP Position mit einem 6-komponenten Kraft-/Drehmomentsensor.

5.2 Voraussetzungen und Randbedingungen für die Gleichgewichtserhaltung

Die Erhaltung des Gleichgewichts während der Bewegung des Roboters ist extrem wichtig für die robuste Durchführung von Lokomotionsaufgaben. Die effiziente Erhaltung des Gleichgewichts ist vor allem durch gezielte Anpassung des linearen Impulses bzw. des Drehimpulses des gesamten Roboters möglich. Durch die Gesetze der Impulserhaltung ist eine solche Anpassung lediglich durch die Kraftwechselwirkung des Roboters mit der Umgebung realisierbar. Die Voraussetzungen und physikalische Randbedingungen für die Gleichgewichtserhaltung werden in diesem Unterkapitel untersucht und bei der Entwicklung eines Stabilisierungssystems weiterverwendet.

Ähnliche Ansätze der Stabilisierung des Gleichgewichts des zweibeinigen mobilen Roboters durch Steuerung des linearen Impulses bzw. Drehimpulses des gesamten Roboters wurden von anderen Autoren bereits beschrieben [140-142]. Jedoch unterscheidet sich der hier dargestellte Ansatz durch Anwendung der ballistischen Methoden zur Bewegungsplanung und Anpassung. Als neuartig stellt sich die simulative sowie experimentelle Erprobung der beschriebenen Konzepte auf einem komplexen dreidimensionalen Robotermodell bzw. Prototyp heraus.

Bei der Entwicklung eines Stabilisierungssystems werden verschiedene Bodenbezugspunkte betrachtet, die während der dynamischen Bewegung relevante Information über den Roboterzustand bereitstellen. Zu diesen Bodenbezugspunkten gehören die Projektion des Massenmittelpunktes (GCoM), Zero Moment Point [5], sowie der Centroidal Moment Point (CMP) [138].

Wie bereits in den vorigen Kapiteln dargestellt wurde, ist der ZMP ein Punkt auf dem Untergrund innerhalb des Stützpolygons, in dem sich der Kraftvektor der gesamten Bodenreaktionskräfte unter dem Fuß befindet und keine Drehmomente vorhanden sind. Dagegen ist der CMP ein Punkt auf dem Untergrund, in dem der Kraftvektor der gesamten Bodenreaktionskräfte agieren müsste, damit kein Drehmoment um den Massenmittelpunkt des Roboters aufgebaut wird. Ein CMP Punkt kann sich auch außerhalb des Stützpolygons befinden.

Der Kraftvektor der gesamten Bodenreaktionskräfte kann als Integral einzelner Bodenreaktionskräfte in jedem Kontaktpunkt über die gesamte Stützfläche des Roboters definiert werden. Die Position des Massenmittelpunktes (Center of Mass – CoM) wird ermittelt als:

$$P_{CoM} = \frac{\sum_i m_i r_i}{\sum_i m_i} \quad (5.17)$$

Der Massenmittelpunkt stellt einen Punkt dar, in dem die gesamte Masse des Roboters vereinigt wird. Daraus folgend kann die Aufgabe der Stabilisierung des Roboters vereinfacht als Aufgabe der Erhaltung des Massenmittelpunktes zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer bestimmten Position betrachtet werden.

Nach der Definition des ZMP, der sich immer innerhalb des Stützpolygons befindet, wirkt der Kraftvektor der gesamten Bodenreaktionskräfte immer von der ZMP-Position aus. Solange kein Drehmoment um den Massenmittelpunkt vom Kraftvektor der gesamten Bodenreaktionskräfte erzeugt wird, schneiden sich die Positionen von ZMP und CMP in einem Punkt.

Wenn aber ein Drehmoment um den Massenmittelpunkt von dem Kraftvektor der gesamten Bodenreaktionskräfte erzeugt wird, weicht die Position des CMP von der Position des ZMP ab. Dabei kann der CMP das Stützpolygon verlassen. Diese Eigenschaft kann weiter für die Stabilisierung des Gleichgewichts vom Vorteil sein. In manchen Fällen ist es nützlich, mit Hilfe von Bodenreaktionskraft ein Drehmoment um den Massenmittelpunkt zu erzeugen, das sich in einer kompensierenden Kraft im Massenmittelpunkt auswirkt. Dafür kann die Position des CMP gezielt von der ZMP-Position entfernt werden, was eine zusätzliche Möglichkeit bietet, die Position des Massenmittelpunktes durch Bodenreaktionskraft zu beeinflussen.

Die Möglichkeit, ein Drehmoment um den Massenmittelpunkt zu erzeugen, geht jedoch auf Kosten der Drehstabilität, weil der Roboterkörper von der vertikalen Lage abweichen kann. Die Aufgabe der Drehstabilität ist dennoch in manchen Fällen zumutbar, wenn diese begrenzt und kurzzeitig auftritt. So kann ein auf einem Bein stehender Roboter wesentlich größeren Störungen entgegenstehen, als es eine Steuerung der ZMP Position erlaubt.

Die Berücksichtigung der Voraussetzungen und Randbedingungen für die Gleichgewichtserhaltung in Form der Eigenschaften des Massenmittelpunktes, des Stützpolygons und der Bodenbezugspunkte wie ZMP und CMP, ist wegen der relativen Einfachheit ausgesprochen wichtig bei der Entwicklung eines Stabilisierungssystems. Dadurch vereinfacht sich die Aufgabe der Stabilisierung eines komplexen Robotersystems auf deutlich simplere Aufgaben,

wie Anpassung des Stützpolygons, Justierung der ZMP-Position innerhalb des Stützpolygons und kurzzeitige Verschiebung des CMP außerhalb des Stützpolygons, um einen zusätzlichen Drehimpuls und damit eine Ausgleichskraft auf den Massenmittelpunkt zu erzeugen.

Es ist bekannt, dass der gesamte Drehimpuls während des normalen menschlichen Gehens gering bleibt [138]. Die entsprechenden Gelenktrajektorien bei der Bewegung des Roboters sind hauptsächlich durch physikalische Randbedingungen, Gelenkstruktur des Systems sowie Zielsetzung der Bewegung definiert. Demzufolge erscheint es sinnvoll, die Regelung des Drehimpulses auch in einem Robotersystem zu durchführen, da eine übermäßige Drehung bzw. Neigung des Roboterkörpers erhebliche Energieverluste verursachen kann.

Die Regelung des Drehimpulses durch die Verschiebung des CMP ermöglicht außerdem die Erstellung eines einfachen Zusammenhangs zwischen der Position des Massenmittelpunktes und des ZMP, was der Vereinfachung des Stabilisierungssystems dient. Dennoch ist hervorzuheben, dass die Erzeugung des Drehimpulses durch die Verschiebung des CMP durch verschiedene Randbedingungen wie zulässige Gelenkwinkel, Winkelgeschwindigkeiten- bzw. Beschleunigung des Gelenks sowie Hindernissen beeinflusst bzw. begrenzt wird.

5.2.1 Drehimpulserhaltung

Die Drehimpulserhaltung ist ein grundlegendes Gesetz der Natur. Es besagt, dass der Drehimpuls eines Körpers um seinen Massenmittelpunkt in Abwesenheit äußerer Kräfte erhalten bleibt. Dementsprechend ruft ein vorhandenes Drehmoment um den Massenmittelpunkt durch Einwirkung äußerer Kräfte eine Änderung des Drehimpulses hervor.

Der Drehimpuls eines Körpers ist proportional zu dessen Winkelgeschwindigkeit:

$$D_{CoM} = I\omega \quad (5.18)$$

wobei I – konstante Trägheitsmatrix, und ω – Winkelgeschwindigkeit ist.

Dieser Drehimpuls bleibt in Abwesenheit der äußeren Kräfte erhalten. Auch wenn bei einem komplexen System mit mehreren Freiheitsgraden der Drehimpuls der einzelnen Segmente variabel sein kann, bleibt der Drehimpuls des gesamten Systems um seinen Massenmittelpunkt in Abwesenheit äußerer Kräfte erhalten.

Der Drehimpuls eines komplexen Systems kann auf folgender Weise ermittelt werden:

$$D_{CoM} = \sum_i \left(I_i \omega_i + m_i v_i \times (P_i^{CoM} - P_{CoM}) \right) \quad (5.19)$$

wobei i – eine Segmentnummer, m_i – die Masse des Segments, I – konstante Trägheitsmatrix des Segments, ω und v Winkel- bzw. Lineargeschwindigkeit des Segments, P_i^{CoM} die Position des Massenmittelpunktes des Segments, und P_{CoM} die Position des Massenmittelpunktes des gesamten Systems ist (s. Abb.5.3).

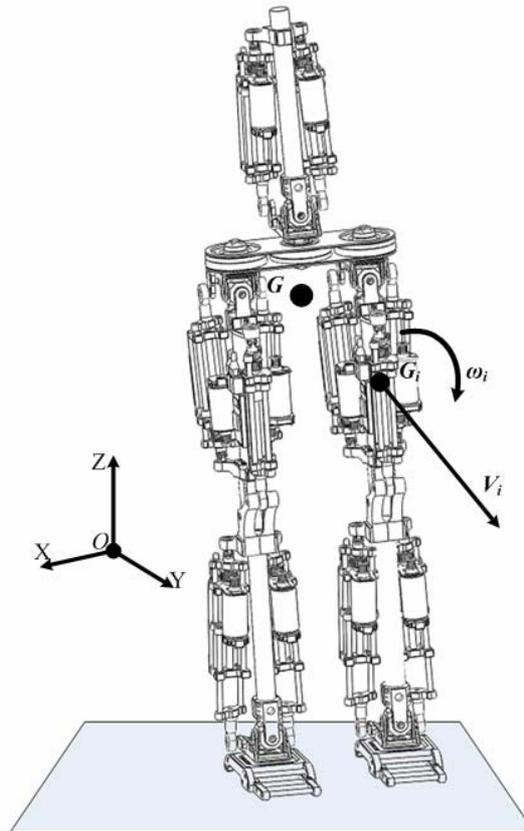


Abb. 5.3 – Massenmittelpunkt des gesamten Systems und des Segments

Auf einen zweibeinigen Roboter wirken beim Kontakt des Roboterfußes mit dem Untergrund äußere Kräfte ein. Da das Drehmoment um den Massenmittelpunkt als eine Ableitung des Drehimpulses ermittelt werden kann, kann durch die äußeren Kräfte ein Drehmoment um den Massenmittelpunkt generiert werden. Das Drehmoment um den Massenmittelpunkt muss über eine lange Zeitspanne bzw. mehrere Schritte zu Null werden, um ein Umkippen des Roboters zu vermeiden.

Wenn die einzige auf einen Roboter einwirkende Kraft die Reaktionskraft unter dem Roboterfuß ist, dann wird der Wirkungspunkt dieser Kraft durch das ZMP beschrieben. Mit Hilfe der ZMP Position kann das Drehmoment um den Massenmittelpunkt wie folgt beschrieben werden:

$$\tau_{CoM} = (r_{ZMP} - r_{CoM}) \times F_R \quad (5.20)$$

wobei r_{ZMP} – die Position des ZMP, r_{CoM} die Position des Massenmittelpunktes, und F_R die Bodenreaktionskraft ist.

Unter Annahme der perfekten Drehimpulserhaltung wird das Drehmoment um den Massenmittelpunkt auf Null gesetzt. Wenn $r_{ZMP_CoM} = (r_{ZMP} - r_{CoM})$ ein Vektor ist, der die Position des CoM mit der Position des ZMP verbindet, kann die Gleichung wie folgt (5.20) umgeschrieben werden:

$$0 = r_{ZMP_CoM} \times F_R \quad (5.21)$$

Die Berechnung der horizontalen Komponenten der Bodenreaktionskraft F_R ergibt:

$$F_x = r_x \frac{F_z}{r_z} \quad (5.22)$$

$$F_y = r_y \frac{F_z}{r_z}$$

wobei r_x , r_y , und r_z dementsprechend zwei horizontale und eine vertikale Komponenten des Vektors r_{ZMP_CoM} , und F_x , F_y , F_z die entsprechende Komponenten der Bodenreaktionskraft F_R sind.

Die Gleichung (5.22) kann auf folgender Weise umgeschrieben werden:

$$F_x = k \cdot r_x \quad (5.23)$$

$$F_y = k \cdot r_y$$

wobei $k = F_z / r_z = -F_z / Z_{CoM}$ als variable vertikale Federsteifigkeit betrachtet wird. Damit stellt die Gleichung 5.23 einen Zusammenhang her zwischen der Kraft im Massenmittelpunkt und der Differenz der horizontalen Positionen des ZMP und CoM.

In Abbildung 5.4 sind die durchgeführten Berechnungen in graphischer Form dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der Vektor der gesamten Bodenreaktionskraft F_R vom ZMP exakt auf dem Massenmittelpunkt gerichtet ist, wenn kein Drehmoment um den Massenmittelpunkt vorhanden ist.

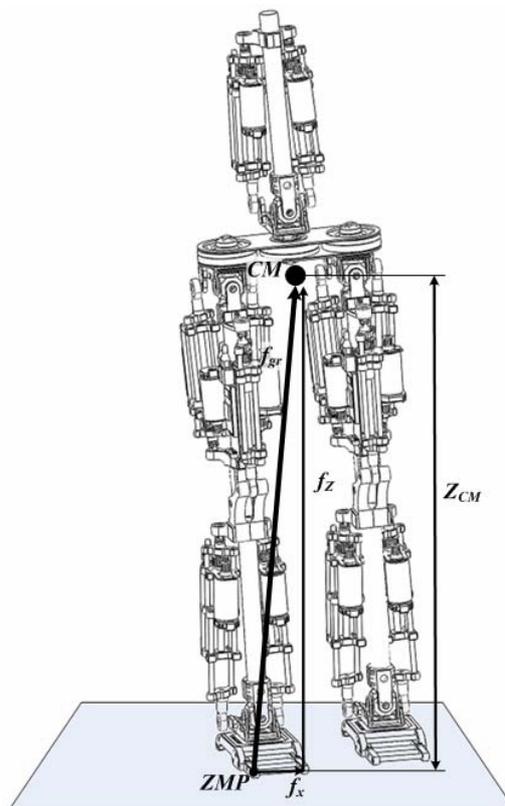


Abb. 5.4 – Darstellung des Zusammenhangs zwischen ZMP und CoM bei perfekter Drehimpulserhaltung

Die Gleichungen 5.23 können außerdem den Zusammenhang zwischen der horizontalen Position des Massenmittelpunktes, der Position des ZMP und horizontalen Beschleunigung des Massenmittelpunktes beschreiben:

$$F_X = m \cdot \ddot{x}_{CoM} = k \cdot \delta_X = k(x_{ZMP} - x_{CoM})$$

$$F_Y = m \cdot \ddot{y}_{CoM} = k \cdot \delta_Y = k(y_{ZMP} - y_{CoM})$$
(5.24)

oder

$$\ddot{x}_{CoM} = \frac{k}{m}(x_{ZMP} - x_{CoM})$$

$$\ddot{y}_{CoM} = \frac{k}{m}(y_{ZMP} - y_{CoM})$$
(5.25)

wobei m die Gesamtmasse ist.

Die Gleichung 5.25 beschreibt den federähnlichen Zusammenhang zwischen der horizontalen Beschleunigung des Massenmittelpunktes (MMP) und der Differenz der horizontalen Positionen von ZMP und MMP.

5.2.2 CMP - Centroidal Moment Pivot

Obwohl in den vorherigen Anschnitten gezeigt wurde, dass die Regelung des Drehimpulses eine ausgesprochen wichtige Eigenschaft für die Stabilisierung der Bewegung ist, ist es trotzdem nicht möglich in allen Situationen das Gleichgewicht mit Hilfe dieser Technik sicher zu stellen. Deswegen ist es sinnvoll, solche Betriebszustände zu untersuchen, in denen die beschriebene Eigenschaft nicht gilt.

Wie bereits dargestellt (s. Abb.5.4), ist der Vektor der gesamten Bodenreaktionskraft F_R vom ZMP exakt auf dem Massenmittelpunkt gerichtet, wenn kein Drehmoment um den Massenmittelpunkt vorhanden ist. Im Umkehrschluss entsteht ein Drehmoment um den Massenmittelpunkt, wenn der Vektor der gesamten Bodenreaktionskraft F_R nicht auf dem Massenmittelpunkt gerichtet ist (s. Abb.5.5). Das Drehmoment um den Massenmittelpunkt entsteht dabei durch die Wirkung der vertikalen Komponente F_Z der Bodenreaktionskraft F_R auf einen Hebelarm L_{dreh} .

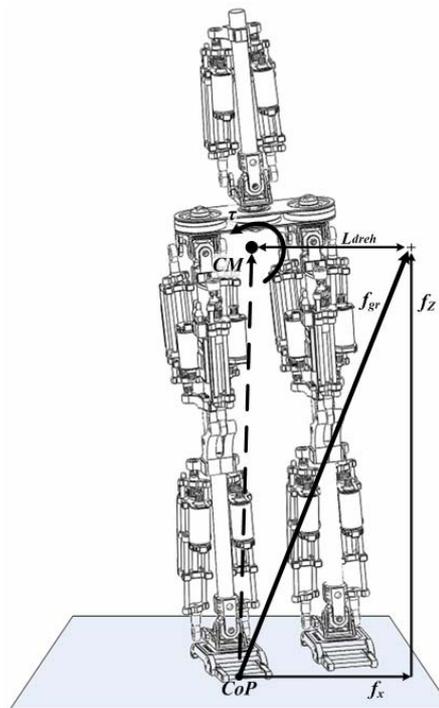


Abb. 5.5 – Das Drehmoment entsteht um den CoM, wenn F_R nicht auf dem CoM gerichtet ist

Wenngleich das Drehmoment um den Massenmittelpunkt mit der Regelung der vertikalen Körperhaltung konfrontiert ist, ermöglicht dieses potenziell die Erzeugung einer größeren horizontalen Kraft als in dem Fall, in dem kein Drehmoment um den Massenmittelpunkt vorhanden ist. Abbildung 5.5 zeigt die Situation, wobei die horizontale Kraft F_X größer ausfällt als wenn die Reaktionskraft F_R auf dem CoM gerichtet wäre (vgl. Abb. 5.4). Da für die Stabilisierung des Gleichgewichts die Steuerung der horizontalen Bewegung des Massenmittelpunktes wesentlich höhere Priorität hat als die Erhaltung der Körperlage, ist diese Eigenschaft äußerst wichtig.

Nach Definition muss der ZMP immer innerhalb des Stützpolygons liegen. Unter der Voraussetzung, dass der Vektor der Reaktionskraft F_R auf dem Massenmittelpunkt gerichtet werden muss, entsteht für die Größe der horizontalen Komponente F_X eine deutliche Begrenzung. Eine Möglichkeit diese Begrenzung zu umgehen ist gegeben, wenn der Vektor der Reaktionskraft weg vom CoM gerichtet werden kann.

Eine andere Möglichkeit die Begrenzung des ZMP zu umgehen ohne dabei die Drehstabilität des Roboters zu gefährden, bietet die Vergrößerung des Stützpolygons. Dies kann z. B. durch einen entsprechenden Schritt erfolgen. Diese Lösung ist jedoch nicht immer möglich, weil oft nur eine begrenzte Oberfläche zur Verfügung steht. So kann sich ein Seiltänzer keinen Schritt zur Seite erlauben, um das Stützpolygon zu erweitern. In diesem Fall ist die Erzeugung einer zusätzlichen horizontalen Kraft im CoM auf Kosten von Drehstabilität zulässig solange die Beeinträchtigung der Drehstabilität kurzzeitig und begrenzt bleibt (z. B. wenn der Arbeitsraum des Hüftgelenks nicht überschritten wird).

Die dargestellten Zustände können effizient mit Hilfe eines Centroidal Moment Point (CMP) [138, 140] beschrieben werden, bei dem ein Drehmoment um den Massenmittelpunkt erzeugt wird. Hier beschreibt der CMP einen Punkt auf der Oberfläche und nicht unbedingt innerhalb des Stützpolygons, wo sich der ZMP befinden müsste, damit der Vektor der Bodenreaktionskräfte F_R auf dem CoM gerichtet wird (s. Abb. 5.6). Ein Hebelarm L_F für das notwendige Drehmoment entsteht durch die Abweichung der CMP Position von der ZMP Position. Diese Abweichung stellt eine zusätzliche im Massenmittelpunkt vorhandene horizontale Kraft dar.

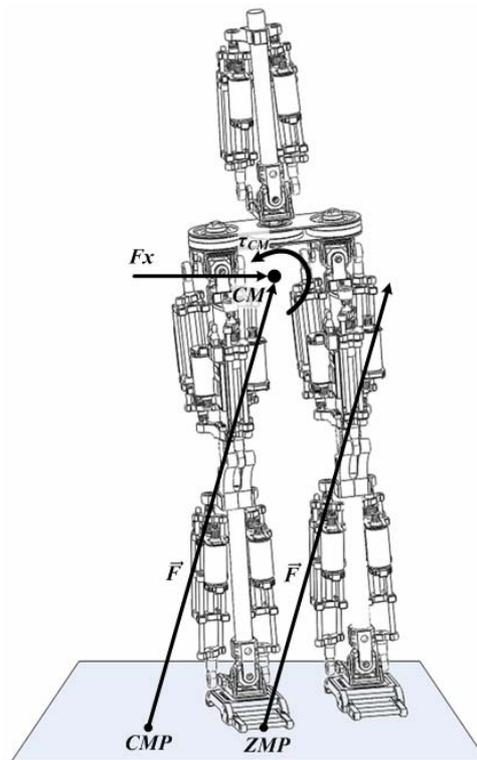


Abb. 5.6 – Definition des Centroidal Moment Points

Abbildung 5.6 stellt eine Situation dar, in der der CMP für die Zurückgewinnung der Stabilität nach einer Störung verwendet wird. Eine Seitenkraft (z.B. ein Ballanschlag) ruft eine Störung des Gleichgewichts hervor. Eine Stabilisierung des Roboters mit Hilfe eines Gegendrehmoments im Fußgelenk stößt schnell an ihre Grenzen, da die ZMP Position schnell den Fußrand und somit die Grenze des Stützpolygons erreicht. Eine Stabilisierung des Systems kann in diesem Fall lediglich durch eine zusätzliche horizontale Kraft im Massenmittelpunkt erreicht werden. Dafür können die Bewegungen des Roboterkörpers, der Arme und des freien Beins genutzt werden, um die Position des CMP zu verschieben und die notwendige horizontale Kraft zu erzeugen. Bei einer großen Störung wird das CMP sogar außerhalb des Stützpolygons bewegt und weicht somit wesentlich von der ZMP Position ab. Die notwendige Abweichung der CMP Position wird durch ein entsprechendes Drehimpuls um den Massenmittelpunkt erzeugt.

5.2.3 FRI – Foot Rotation Indicator

Die Bodenbezugspunkte stellen effiziente Bezugsgrößen dar, um die dynamischen Zustände des Roboters während der Bewegung zu beschreiben. Aus den vorherigen Abschnitten ist ersichtlich, dass z. B. Anhand der Information über die Position von ZMP bereits eine simple und dennoch effiziente Technik zur Stabilisierung des Gleichgewichts entwickelt werden kann.

Durch ein zusätzliches Drehmoment z.B. im Fußgelenk oder in anderen Gelenken kann die Position des ZMP gezielt verschoben werden, um eine stabilisierende Kraft im Massenmittelpunkt zu erzeugen. Da nach Definition das ZMP das Stützpolygon nicht verlassen darf, ist die aus der Manipulation der ZMP-Position hervorgehende kompensierende Wirkung begrenzt.

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung der stabilisierenden Kraft, geht aus der Definition eines CMP-Punktes hervor, der im Gegensatz zum ZMP das Stützpolygon verlassen darf und somit auch wesentlich größere Kräfte bereitstellen kann. Die Position des CMP kann durch eine gezielte Steuerung der Bewegung von unbelasteten Gliedmaßen beeinflusst werden. Die gezielte Verschiebung der CMP-Position außerhalb des Stützpolygons erzeugt ein zusätzliches Drehmoment um den Massenmittelpunkt und stellt somit eine zusätzliche stabilisierende Kraft zur Verfügung.

Eine der wichtigsten Voraussetzungen während der Bewegung des zweibeinigen Roboters ist, dass der Standfuß während der Einstützphase flach zum Boden bleiben soll. Im Gegensatz zu konventionellen Industriemanipulatoren, die fest auf dem Boden fixiert sind, ist der Standfuß des mobilen Roboters in keiner Weise mit dem Boden verbunden. Das bedeutet weiterhin, dass der Standfuß in der Lage ist, jeder Zeit über den Fußrand zu rollen und der Kontakt mit dem Boden zu verlieren. Der Roboterfuß kann z. B. über den Fußrand rollen wenn das Drehmoment im Fußgelenk zu groß wird, weil das Stützpolygon eine begrenzte Größe aufweist.

Der Kontakt des Roboterfußes mit dem Untergrund kann als ein nicht gesteuerter Freiheitsgrad betrachtet werden, wenn der Fuß über den Fußrand rollt. Wenn der Fuß flach zum Boden bleibt, kann dieser als „fixiert“ betrachtet werden. Dennoch bedingt eine begrenzte Fußfläche auch, dass lediglich ein begrenztes Drehmoment im Fußgelenk agieren kann. Ein größeres Drehmoment ruft eine Rollbewegung über den Fußrand und somit einen nicht gesteuerten Freiheitsgrad im Kontaktpunkt hervor. Um das zu verhindern, muss die Dynamik des Fußes entsprechend geregelt werden.

Die Information über den Zustand des Standfußes kann mit Hilfe eines Bodenbezugspunktes genannt *Foot Rotation Indicator* (FRI) [71] gewonnen werden. Der FRI Punkt wird als ein Punkt auf dem Boden definiert, in dem der Vektor der gesamten Bodenreaktionskraft agieren soll, um das Rollen des Standfußes zu verhindern. Wenn der Standfuß flach auf dem Boden steht, bleibt der FRI Punkt innerhalb des Stützpolygons. Wenn sich der FRI Punkt außerhalb des Stützpolygons befindet, ist der Fuß nicht mehr flach und rollt über den Fußrand.

In Abbildung 5.7 ist die Position des FRI Punktes dargestellt. Wenn sich der FRI Punkt unmittelbar am Fußrand befindet, ist der Roboterfuß im Übergangszustand zwischen dem flachen und rollenden Fuß.

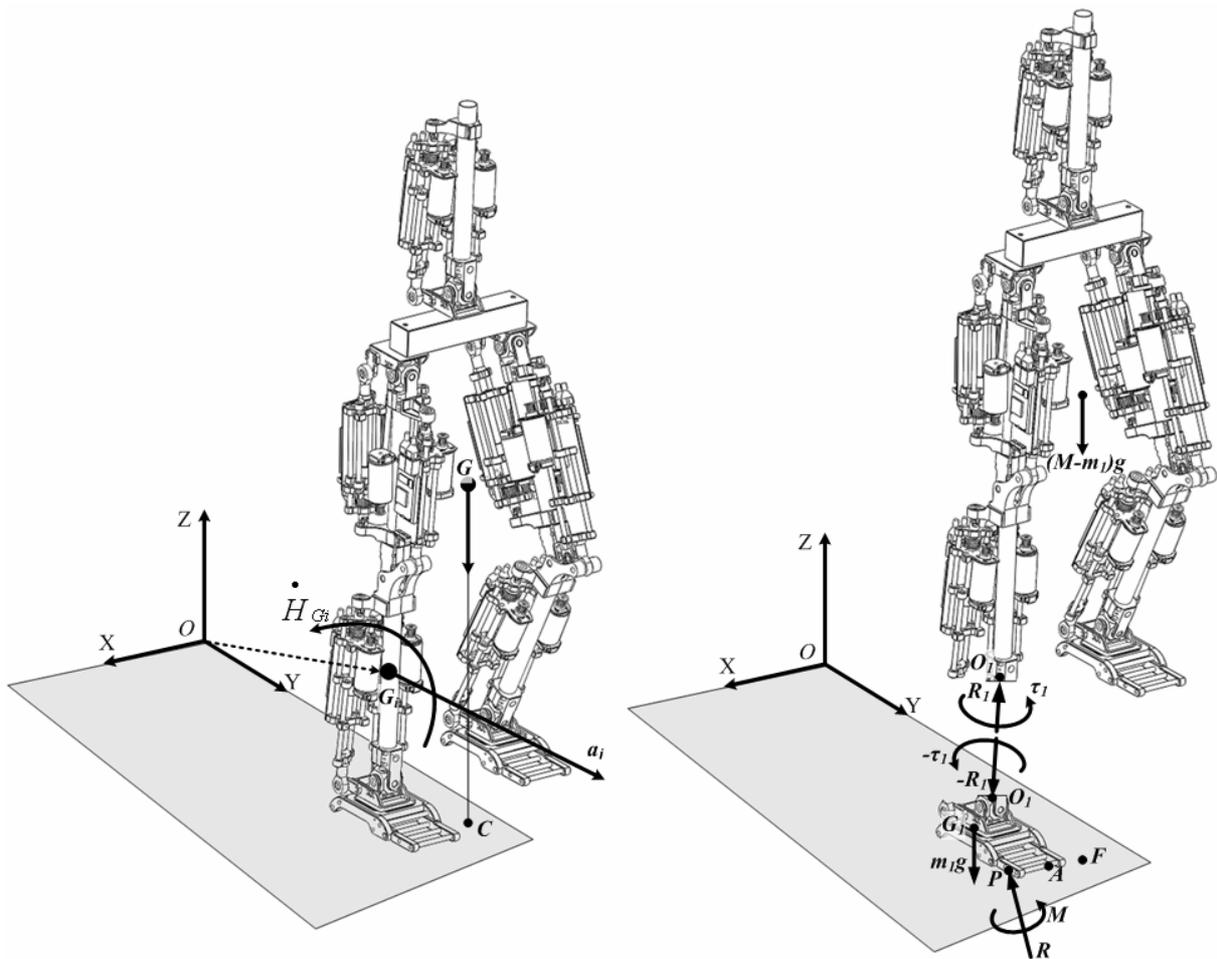


Abb. 5.7 – Foot Rotation Indicator (nach [71, 140])

In Abbildung 5.7 werden folgende Variablen verwendet:

- G – Position des Massenmittelpunktes,
- M – Gesamtmasse des Systems,
- G_i – Massenmittelpunkt des Gliedes i ,
- m_i – Masse des Gliedes i ,
- τ_i – Drehmoment im Gelenk i ,
- a_i – lineare Beschleunigung des Gliedes i .

Der FRI Punkt kann durch folgende Gleichung des Drehmomentgleichgewichtes beschrieben werden [71, 140]:

$$\sum_{i=2}^n FG_i \times m_i g = \sum_{i=2}^n \dot{H}_i + \sum_{i=2}^n FG_i \times m_i a_i \quad (5.26)$$

Diese Gleichung legt fest, dass die Summe aller Drehmomente um den FRI Punkt, die durch die Fallbeschleunigung des Massenmittelpunktes vom jeden Glied (links) und durch lineare Beschleunigung (rechts) hervorgerufen ist, gleich der Summe aller Gelenkdrehmomente ist. Diese kann ebenso für die X-Z Ebene in folgender Form beschrieben werden:

$$\sum_{i=2}^n FG_{xi} f_{zi} = \sum_{i=2}^n \dot{H}_i + \sum_{i=2}^n FG_{zi} f_{xi} \quad (5.27)$$

wobei

$$\begin{aligned} f_{xi} &= m_i a_{xi} \\ f_{zi} &= m_i (g - a_{zi}) \end{aligned}$$

Auf ähnliche Weise kann die Gleichung für die Y-Z Ebene abgeleitet werden.

Der Vektor FG_i , der vom FRI Punkt aus auf dem Massenmittelpunkt vom jedem Glied gerichtet ist, kann als Summe zweier Vektoren dargestellt werden.

$$FG_i = FG + GG_i \quad (5.28)$$

wobei:

FG – der Vektor, der vom FRI Punkt aus auf dem CoM des Roboters gerichtet ist und

GG_i – der Vektor, der vom CoM des Roboters aus auf dem CoM des Gliedes i gerichtet ist.

Die Gleichung (5.27) ergibt:

$$\sum_{i=2}^n GG_{xi} f_{zi} + FG_x f_z = \sum_{i=2}^n \dot{H}_i + \sum_{i=2}^n GG_{zi} f_{xi} + FG_z f_x \quad (5.29)$$

Der Vektor FG , der vom FRI Punkt aus auf dem CoM des Roboters gerichtet ist, kann ebenfalls in zwei Vektoren aufgeteilt werden.

$$FG = FO + OG \quad (5.30)$$

wobei:

O – ein Ursprungspunkt auf der Fußsohle genau unter dem Sprunggelenk ist,

FO – der Vektor, der vom FRI Punkt aus auf dem Ursprung O gerichtet ist und

OG – der Vektor, der vom Ursprung O aus auf dem CoM des Roboters gerichtet ist.

Oder für die einzelne Komponenten:

$$\begin{aligned} FG_x &= FO_x + OG_x \\ FG_z &= FO_z + OG_z = OG_z \end{aligned}$$

Daraus folgt:

$$-OF_x f_z + OG_x f_z - OG_z f_x = \sum_{i=2}^n \dot{H}_i + \sum_{i=2}^n GG_{zi} f_{xi} + \sum_{i=2}^n GG_{xi} f_{zi} \quad (5.31)$$

Die Gleichung (5.31) stellt ein Drehmomentgleichgewicht dar [71, 140]:

$$\tau_{stütz} - \tau_{orbit} = \tau_{dreh} \quad (5.32)$$

wobei

$$\begin{aligned} \tau_{stütz} &= -OF_x f_z \\ \tau_{orbit} &= OG_z f_x - OG_x f_z \\ \tau_{dreh} &= \sum_{i=2}^n \dot{H}_i + \sum_{i=2}^n GG_{zi} f_{xi} + \sum_{i=2}^n GG_{xi} f_{zi} \end{aligned}$$

Hier wird das Drehmoment des gesamten Systems um den Ursprung O als τ_{orbit} bezeichnet. Das Drehmoment um den Massenmittelpunkt des Roboters wird τ_{dreh} genannt. Und $\tau_{stütz}$ bezeichnet das Drehmoment im Sprunggelenk des Stützbeines [71, 140].

Um das Rollen des Standfußes zu vermeiden, darf der FRI Punkt das Stützpolygon nicht verlassen. Das bedeutet, dass der Vektor OF , der vom Ursprung O aus auf dem FRI Punkt gerichtet ist, durch das Stützpolygon begrenzt ist. Dadurch ist das Drehmoment im Sprunggelenk $\tau_{stütz}$ gleichermaßen begrenzt (s. Gleichung 5.32). Die translatorische Bewegung des Massenmittelpunktes wird durch die Wirkung des Drehmoments τ_{orbit} um den Ursprung O ausgelöst. Wie aus der Drehmomentgleichung (5.32) ersichtlich ist, kann das Drehmoment um den Massenmittelpunkt des Roboters τ_{spin} genutzt werden, um ein zusätzliches Drehmoment zum begrenzten Drehmoment $\tau_{stütz}$ im Sprunggelenk zu erzeugen. Dadurch kann ein ausreichendes Drehmoment τ_{orbit} des gesamten Systems und folglich die notwendige Bewegung des Massenmittelpunktes erzeugt werden.

5.3 Gleichgewicht und Ballistik

Das bereits im Kapitel 4 dargestellte Verfahren zur Generierung der ballistischen Trajektorien kann auch unter Berücksichtigung zusätzlicher Randbedingungen wie Position oder Trajektorien der Bodenbezugspunkte verwendet werden. Dabei werden die Trajektorien gefunden, die einer ballistischen Bewegung des Robotersystems unter Berücksichtigung des Gleichgewichtszustands entsprechen. Dennoch treten bei der Untersuchung an einem realen Prototyp des Roboters unterschiedliche Störungen auf, die auch unter exakter Abarbeitung der ballistischen Trajektorien das Gleichgewicht des Roboters beeinflussen. Solche Störungen können z. B. durch Modellfehler, unbekannte Reibungsfaktoren oder mechanische Eigenschaften des Untergrunds entstehen. Effiziente Berücksichtigung und Ausregelung solchen Störungen mit dem Ziel der Erhaltung des Gleichgewichts ist durch Einführung erweiterter Regelungsstrukturen möglich.

Basierend auf den im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeiteten Methoden wurde ein Konzept zum Aufbau der mittleren Schicht des hierarchischen Steuerungssystems vorgeschlagen. Die Struktur des Steuerungssystems ist in der Abbildung 5.8 dargestellt.

Das vorgeschlagene Konzept setzt das Ziel, die gewünschte Fortbewegung des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO zu ermöglichen. Dabei wird die Fortbewegung des Roboters lediglich über die Geschwindigkeit seines Massenmittelpunktes gesteuert. Alle notwendigen Aufgaben der Generierung der Bewegungstrajektorien sowie der Gleichgewichtserhaltung werden komplett in der mittleren Schicht des Steuerungssystems abgewickelt.

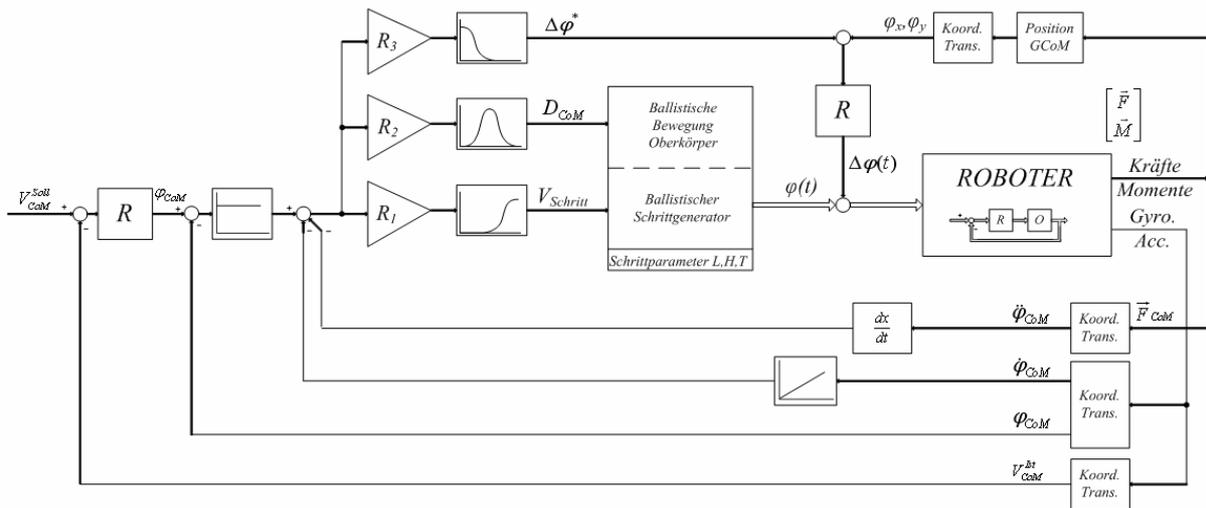


Abb. 5.8 – Gesamtstruktur des Steuerungssystems für einen zweibeinigen mobilen Roboter mit ballistischem Laufverhalten

Das Steuerungssystem (Abb. 5.8) besteht im Wesentlichen aus drei Regelstrukturen (Regelkanäle). Diese Strukturen sind entsprechend der in vorigen Abschnitten dargestellten Strategien zur Gleichgewichtserhaltung aufgebaut. So ist einen Regelkanal für die Kompensation kleiner Störkräfte, die durch Verschiebung bzw. Auslenkung des Vektors der gesamten Bodenreaktionskraft hervorgerufen sind, ausgelegt. Dieser Regelkanal ist in Form einer Impedanzregelung ausgelegt und bewirkt die Trajektorienanpassung anhand der Abweichung vom gewünschten Bodenbezugspunkt.

Große Störkräfte bzw. Veränderung der Geschwindigkeit des Massenmittelpunktes werden im zweiten Regelkanal behandelt. Dieser beinhaltet einen Schrittzklusgenerator, der in Abhängigkeit von Abweichung in der Geschwindigkeit des Massenmittelpunktes parametrisiert wird. Entsprechend den einstellbaren Parametern berechnet der Generator die Trajektorien einzelner Gelenke, die zur Durchführung des gewünschten Schrittes notwendig sind. Der Generator kann sowohl mit Hilfe einer mathematischen Funktion, als auch in Form eines ballistischen Generators aufgebaut werden.

Ein dritter Regelkanal ist optional und ist für die Kompensation mittelgroßer Störkräfte durch eine zusätzliche Kraft im Massenmittelpunkt vom Vorteil. Diese Kraft kann durch die Erzeugung eines Drehimpulses im Massenmittelpunkt des Roboters aufgebaut werden. Eine entsprechende Bewegung bestimmter Körperteile (z. B. Oberkörper oder Arme) bzw. allen Gelenken des Roboters, kann in diesem Fall mit Hilfe von vorgeschlagener Methode der Generierung der ballistischen Bewegung gefunden werden.

Für die Bestimmung der Abweichung der Winkelposition des Massenmittelpunktes wird der Zustandsvektor des Massenmittelpunktes aufgrund der Information von Inertialsensoren, Kraft/Drehmomentsensoren und entsprechender Transformationen erfasst. Die gewünschten Trajektorien einzelner Gelenke werden durch einen entsprechenden lokalen Gelenkregler abgearbeitet.

Die Funktion des dargestellten Konzepts wurde anhand der vereinfachten Strukturen für einzelne Regelkanäle geprüft. In Abbildung 5.9 ist die vereinfachte Struktur des Steuerungssystems mit geregelter Schrittgeschwindigkeit (zweiter Regelkanal) dargestellt. Zwecks sinnvoller Vereinfachung wurden die Schrittzyklen und dadurch auch die Trajektorien der

Robotergelenke in Form einer parametrierbaren, elliptischen Funktion erzeugt. Als Regelstrecke wird ein ebenfalls vereinfachtes Robotermodell (vier aktive Freiheitsgrade und drei Freiheitsgrade des Massenmittelpunktes) ausgewählt. Die Bewegung des Roboters wird lediglich in sagittaler Ebene betrachtet. Der Fehler in der Geschwindigkeit des Massenmittelpunktes des Roboters bewirkt die entsprechende Anpassung der Parameter des Schrittzyklus.

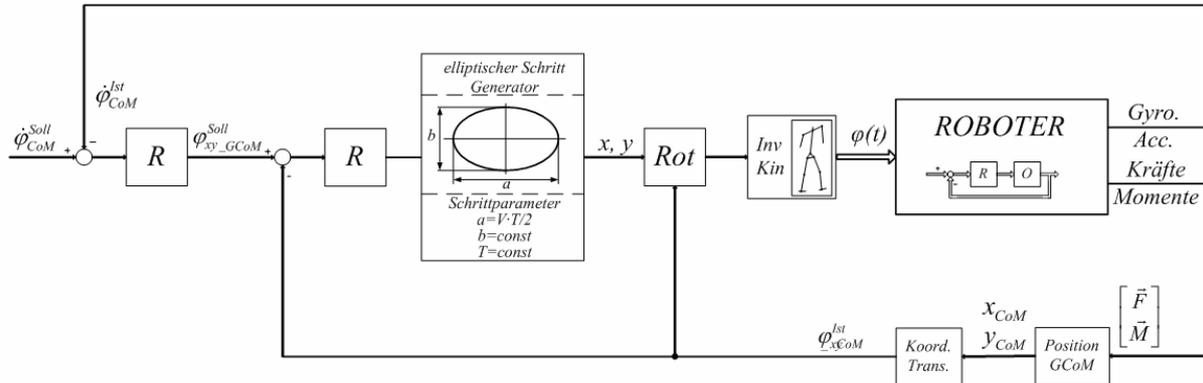


Abb. 5.9 – Vereinfachte Struktur des Steuerungssystems mit geregelter Schrittgeschwindigkeit

Abbildung 5.10 zeigt die Regelung der Geschwindigkeit des Massenmittelpunktes durch Anpassung der Schrittlänge und dadurch der Schrittgeschwindigkeit.

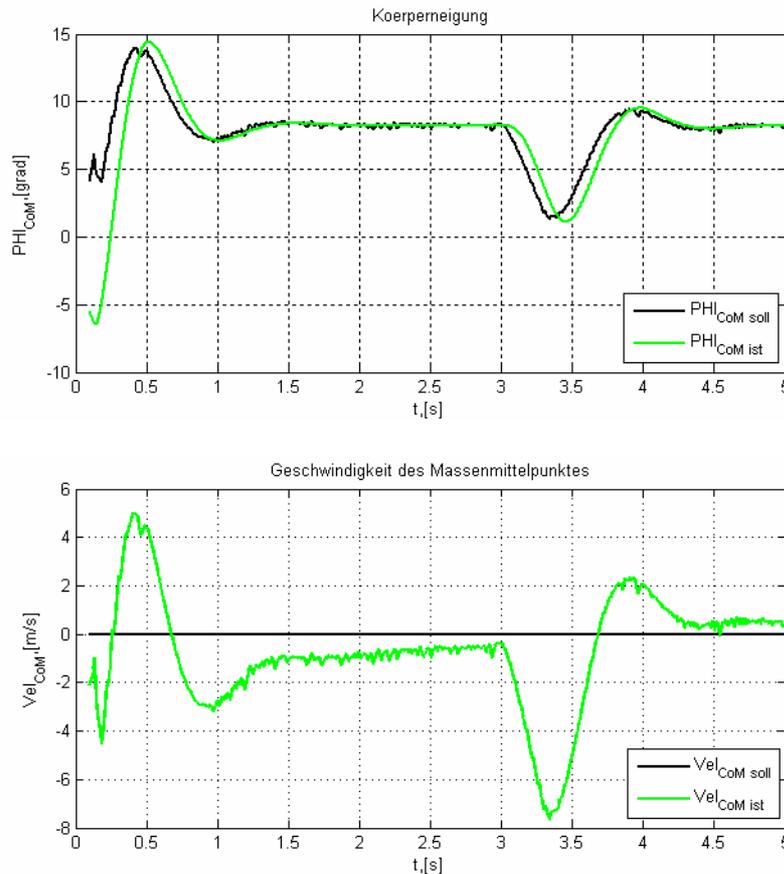


Abb. 5.10 – Regelung der Geschwindigkeit des Massenmittelpunktes durch Anpassung der Schrittgeschwindigkeit

In Abbildung 5.11 ist die vereinfachte Struktur des Steuerungssystems mit geregelter Position des Massenmittelpunktes (erster Regelkanal) dargestellt. Zwecks Dämpfung der Schwingungen des Massenmittelpunktes (Veränderung der Winkelgeschwindigkeit des Roboterkörpers) wird eine zusätzliche Regelschleife eingeführt. Als Regelstrecke wird ein komplettes dreidimensionales Modell des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO mit zwölf angesteuerten Freiheitsgraden verwendet.

Die Aufgabe der Stabilisierung der Position des Massenmittelpunktes des Roboters wird in einer Simulation „Stehen auf einem Bein“ untersucht. Als eine Störung agiert dabei die Verlagerung des Massenmittelpunktes des Roboters durch unterschiedliche Auslenkung des freien Beins. Die Verlagerung des Massenmittelpunktes wird durch den Kraft-/ Drehmomentensensor im Stützbein als Verschiebung der Bodenreaktionskraft erfasst und muss durch eine Gleichgewichtsregelung in den Ursprungszustand kompensiert werden.

Während des Experiments wird die Lage des freien Beins programmtechnisch alle zehn Sekunden verändert. Das führt dazu, dass der Massenmittelpunkt des Roboters in eine neue Position relativ zum Roboterfuß verschoben wird. Die Verschiebung des Massenmittelpunktes wird bei aktiver Regelung über zusätzliche Drehmomente im Fußgelenk kompensiert. Der Projektion des Massenmittelpunktes wird somit in den Ursprung zurückgebracht. Bei inaktiver Regelung führt die Verschiebung des Massenmittelpunktes schnell zum Umkippen des Roboters, da die Projektion des Massenmittelpunktes den Fußrand erreicht und den stabilen Bereich verlässt.

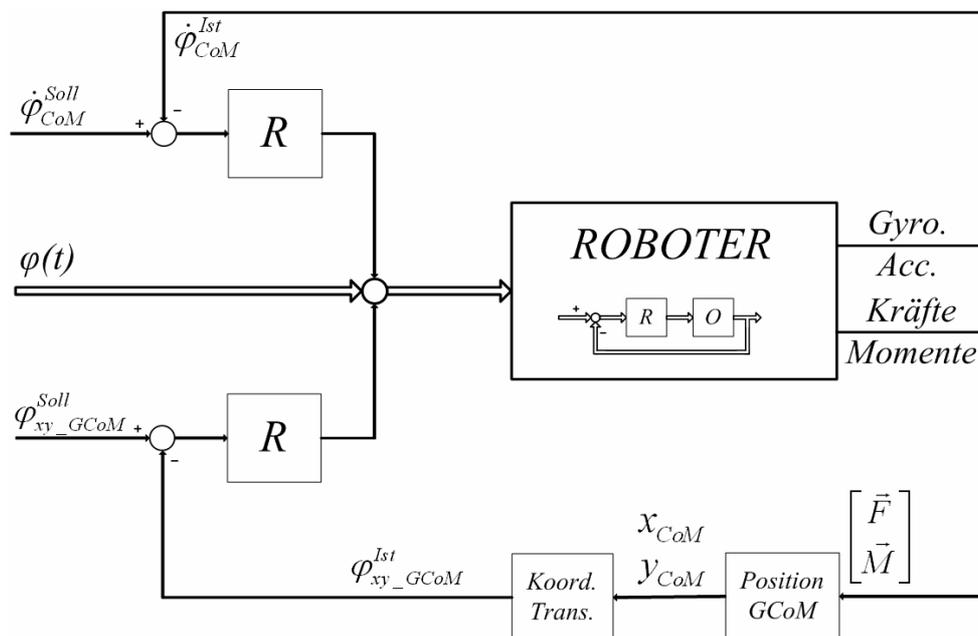


Abb. 5.11 – Vereinfachte Struktur des Steuerungssystems mit geregelter Position des Massenmittelpunktes

In Abbildung 5.12 sind die Gelenkwinkel des freien Beins, die horizontale Komponenten der Bodenreaktionskraft, die entsprechende Drehmomente im Fußgelenk des Stützbeines sowie die Position der Projektion des Massenmittelpunktes auf die Oberfläche für beide Experimente vergleichend dargestellt. Das dargestellte Konzept wurde sowohl in simulativen als auch in praktischen Experimenten untersucht. In beiden Fällen wurde die Funktionsfähigkeit des Konzepts anhand vergleichbarer Ergebnisse nachgewiesen. Die repräsentativen Ergebnisse experimenteller Untersuchungen sind im Kapitel 6 dargelegt.

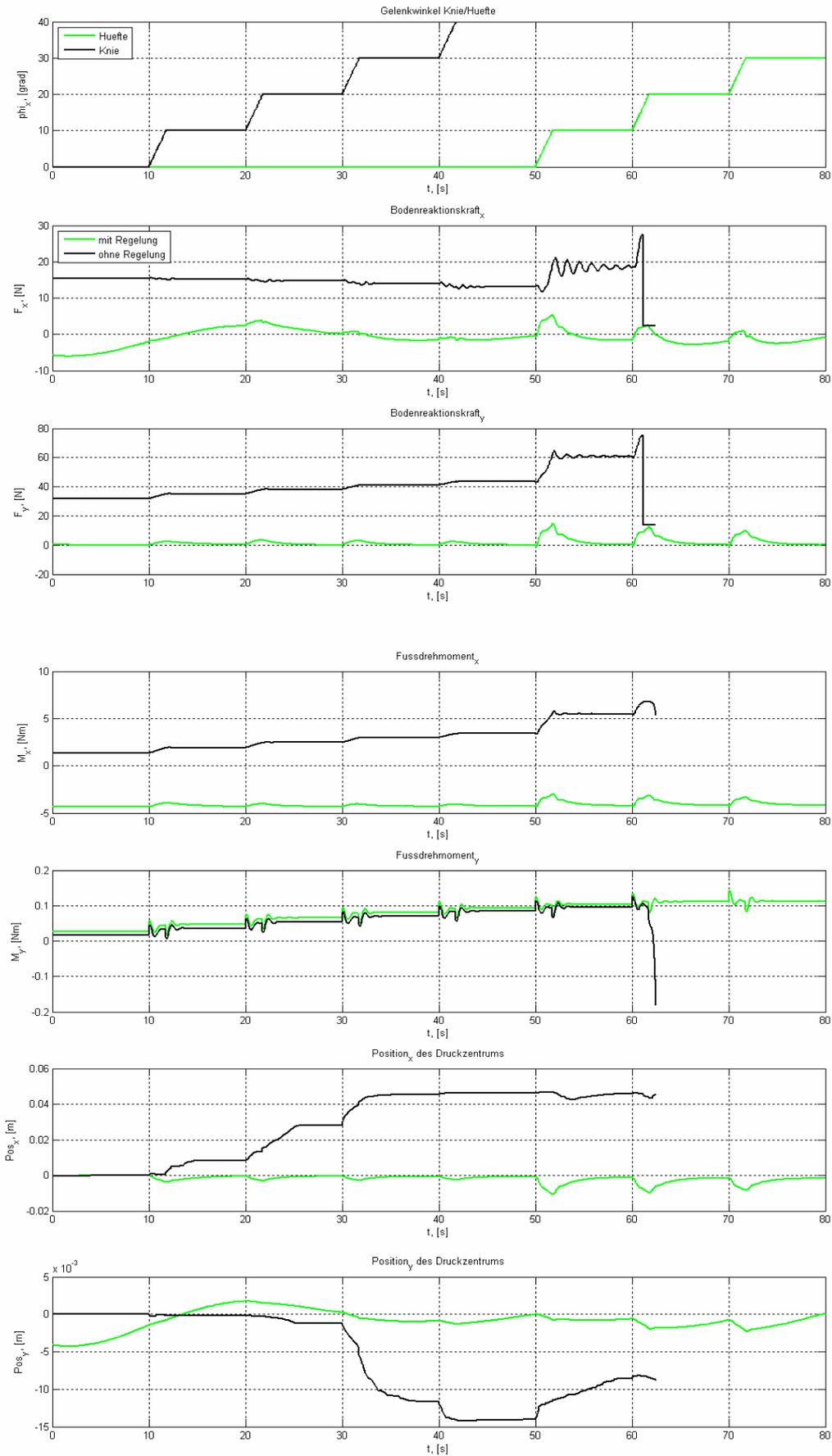


Abb. 5.12 – Erhaltung des Gleichgewichts durch die Regelung der Position des Massenmittelpunktes

5.4 Zusammenfassung

Die Kraftwechselwirkung im Kontakt zwischen dem Roboterfuß und der Oberfläche spielt eine besondere Rolle bei der Analyse der dynamischen Eigenschaften des Systems. Da die Roboterfüße keine Zugkraft im Bezug auf den Untergrund erzeugen können, handelt es sich in diesem Fall um eine einseitige Krafteinwirkung.

In diesem Kapitel wurde die Aufgabe der Gleichgewichtserhaltung betrachtet. Um die Aussagen bezüglich des statischen und dynamischen Verhaltens des Robotersystems zu bekommen, wurden verschiedene Bodenbezugspunkte definiert und verglichen sowie verschiedene Methoden zu deren Abschätzung gezeigt. Basierend auf der Information über die Bodenreaktionskraft unter dem Roboterfuß können die Maßnahmen zur Erhaltung des Gleichgewichts erarbeitet werden.

Der Roboter kann lediglich über die Kraft unter dem Fuß/unter den Füßen auf die Oberfläche einwirken, um eine Verlagerung bzw. Auslenkung des Vektors der gesamten Bodenreaktionskraft auszulösen. Die Verlagerung bzw. Auslenkung des Vektors der gesamten Bodenreaktionskraft wird notwendig, um eine gewünschte Kraft im Massenmittelpunkt zu erzeugen. Die Kraft im Massenmittelpunkt beschleunigt diesen in die gewünschte Richtung. Die Fähigkeit des Roboters, den Massenmittelpunkt zu beschleunigen, ist jedoch durch die erhebliche Massenträgheit des Systems sowie das eingeschränkte Vermögen ausreichend große Reaktionskräfte zu erzeugen, begrenzt. Eine inkorrekte oder ungenügende Behandlung dieser Eigenschaft führt sehr schnell zum Gleichgewichtverlust.

Abschließend wurde ein Konzept zum Aufbau der mittleren Schicht (Primitive Level) des Steuerungssystems präsentiert und erläutert. In diesem Konzept wurden alle im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeitete Methoden zusammengefasst, um die gewünschte Fortbewegung des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO zu ermöglichen.

Im nachfolgenden Kapitel werden die repräsentativen Ergebnisse der simulativen und praktischen Experimente dargestellt.

Kapitel 6

Experimentelle und Simulationsergebnisse mit dem zweibeinigen mobilen Roboter ROTTO

In Rahmen vorliegender Arbeit wurden zahlreiche Simulationen des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO durchgeführt und anschließend anhand praktischer Experimente verifiziert. Dabei dienten die detaillierten Simulationen nicht nur der Untersuchung der statischen und dynamischen Eigenschaften des Roboters, sondern auch der konsekutiven Optimierung der konstruktiven Auslegung des Roboters und Dimensionierung der Roboterantriebe. Das Steuerungssystem wurde ebenfalls in mehreren simulativen Experimenten untersucht und optimiert. Der sechsbeinige mobile Roboter ANTON diente ebenfalls als Testplattform bei der Überprüfung der dargestellten Konzepte. Die repräsentativen Ergebnisse dieser Experimente können [22, 24, 26] entnommen werden.

Die simulativen Untersuchungen des Robotermodells erlauben die Funktionsprüfung des Systems auch in schwierigen Situationen, ohne dem System wahrscheinlichen mechanischen Schaden hinzuzufügen und ohne zur katastrophalen Zerstörung des Systems zu führen. Obwohl die Simulationen extrem hilfreich bei der Untersuchung des Robotermodells sind, können diese die experimentellen Untersuchungen an einem realen Roboter nicht vollständig ersetzen. Die experimentellen Untersuchungen haben nicht das Ziel der endgültigen Validierung der Simulationsergebnisse. Während der Experimente treten in der Regel zahlreiche Störungen und Effekte wie Reibung, Kontakt oder thermische Effekte auf, die in Rahmen der Simulation nur begrenzt berücksichtigt werden können. Die simulative und experimentelle Untersuchungen ergänzen somit einander, um einen möglichst vollständigen Blick auf die Eigenschaften des Systems zu bekommen.

In diesem Kapitel werden die repräsentativen Ergebnisse für die Stabilisierung der Körperlage des zweibeinigen Roboters, die Stabilisierung des Massenmittelpunktes beim Stehen auf einem Bein sowie für eine ballistische Bewegung des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO vorgestellt. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Verläufe folgender Größen gerichtet.

Die Gelenkwinkel werden mit Hilfe von in den Gelenken angebrachten magnetischen Absolutwertgebern erfasst und für die Analyse des Arbeitsbereichs bei der jeweiligen Bewegung verwendet. Der Vergleich der gemessenen und generierten Gelenkwinkel lässt die

Eigenschaften der Antriebsregelung bewerten. Die Gelenkwinkelgeschwindigkeit wird aus den entsprechenden Motorgeschwindigkeiten errechnet und ebenfalls bei der Bewertung der Eigenschaften der Antriebsregelung benötigt. Eine hochqualitative Abarbeitung der generierten Trajektorien ist dabei eine Voraussetzung für die Durchführung der gewünschten Roboterbewegung.

Wie bereits im vorigen Kapitel dargestellt wurde, sind die Bodenreaktionskräfte des Roboters im Kontakt mit der Oberfläche eine besondere Informationsquelle über die dynamischen Eigenschaften des Systems. Aus diesen Informationen werden Rückschlüsse über das Gleichgewicht des Roboters gewonnen und im Steuerungssystem berücksichtigt.

Position und Geschwindigkeit der Roboter Antriebe sind ebenfalls von großem Interesse, da die Gelenke des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO über eine spezielle parallelkinematische Konstruktion bewegt werden. Die gewünschte Bewegung des Gelenks entsteht dabei durch Ansteuerung der Linearantriebe und erfordert die Berücksichtigung der entsprechenden Koordinatentransformation.

6.1 Beschreibung der Testplattform

In der aktuellen Ausbaustufe verfügt der zweibeinige mobile Roboter ROTTO über insgesamt zwölf Freiheitsgrade. Die Anzahl und Aufteilung der Freiheitsgrade stellt dabei gewisse Randbedingungen an die experimentellen Untersuchungen. So konnten aufgrund des Fehlens der vertikalen Rotation im Hüftgelenk die Laufexperimente lediglich in einem begrenzten Umfang durchgeführt werden. Abbildung 6.1 stellt den zweibeinigen mobilen Roboter ROTTO als eine Testplattform dar.

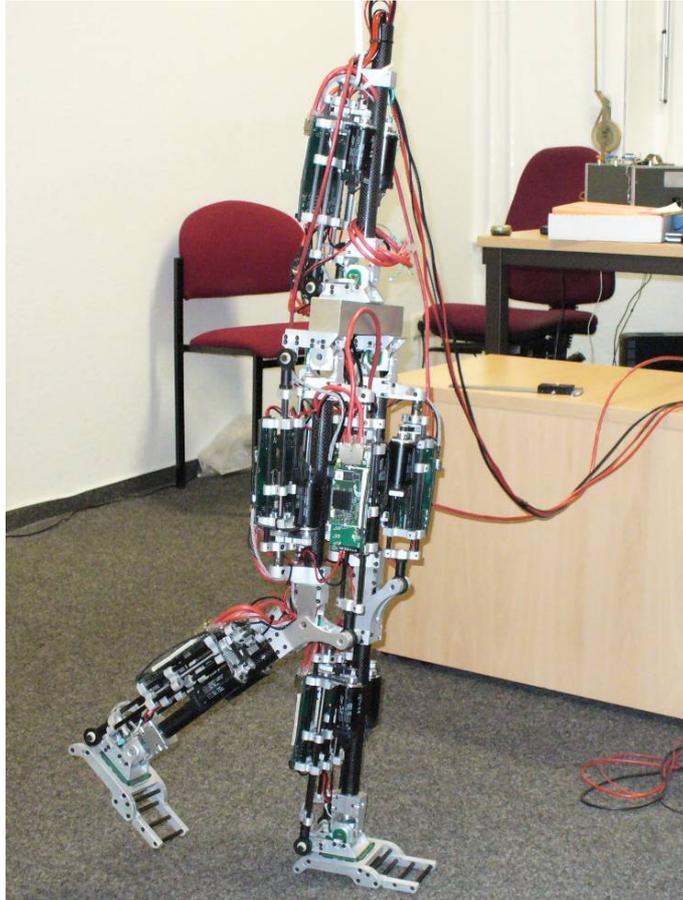


Abb. 6.1 – Testplattform: Zweibeiniger mobiler Roboter ROTTO

6.2 Gleichgewichterhaltung beim Stehen

Die Information über das Gleichgewicht des Roboters kann mit Hilfe von Inertialsensoren im Roboterkörper und Kraftsensoren in Füßen gewonnen werden. Obwohl der Betriebsart „Still Stehen“ in einem Roboter auch ohne Berücksichtigung der Information über das Gleichgewicht realisiert werden kann, können die Eigenschaften der Gleichgewichtsregelung in diesem Experiment gut beobachtet und untersucht werden.

6.2.1 Stehen mit beiden Beinen

In diesem Experiment wird die Aufgabe der Regelung der Körperlage des Roboters beim Stehen mit beiden Beinen untersucht. Aus einer um 10 Grad geneigten Position in sagittaler Ebene wird der Roboter losgelassen und schwingt nach vorn, um eine aufrechte Position zu erreichen.

Abbildung 6.2 zeigt eine Bildsequenz des Experiments für die Fälle mit (rechts) und ohne (links) Regelung der Drehmomente im Fußgelenk. Während des Experiments werden die Beschleunigungen und Drehgeschwindigkeiten des Roboterkörpers mit Hilfe eines inertialen Drehgeschwindigkeitgebers aufgenommen. Durch die Regelung der Drehmomente im Fußgelenk wird die Drehgeschwindigkeit des Roboterkörpers aktiv gedämpft. Ohne aktive Dämpfung der Drehgeschwindigkeit des Roboterkörpers dauern die Schwingungen mehrere Sekunden, bis der Roboter eine aufrechte Position annehmen kann.

In Abbildung 6.3 sind der Neigungswinkel und die Drehgeschwindigkeit des Roboterkörpers sowie das Drehmoment im Fußgelenk für beide Experimente vergleichend dargestellt.

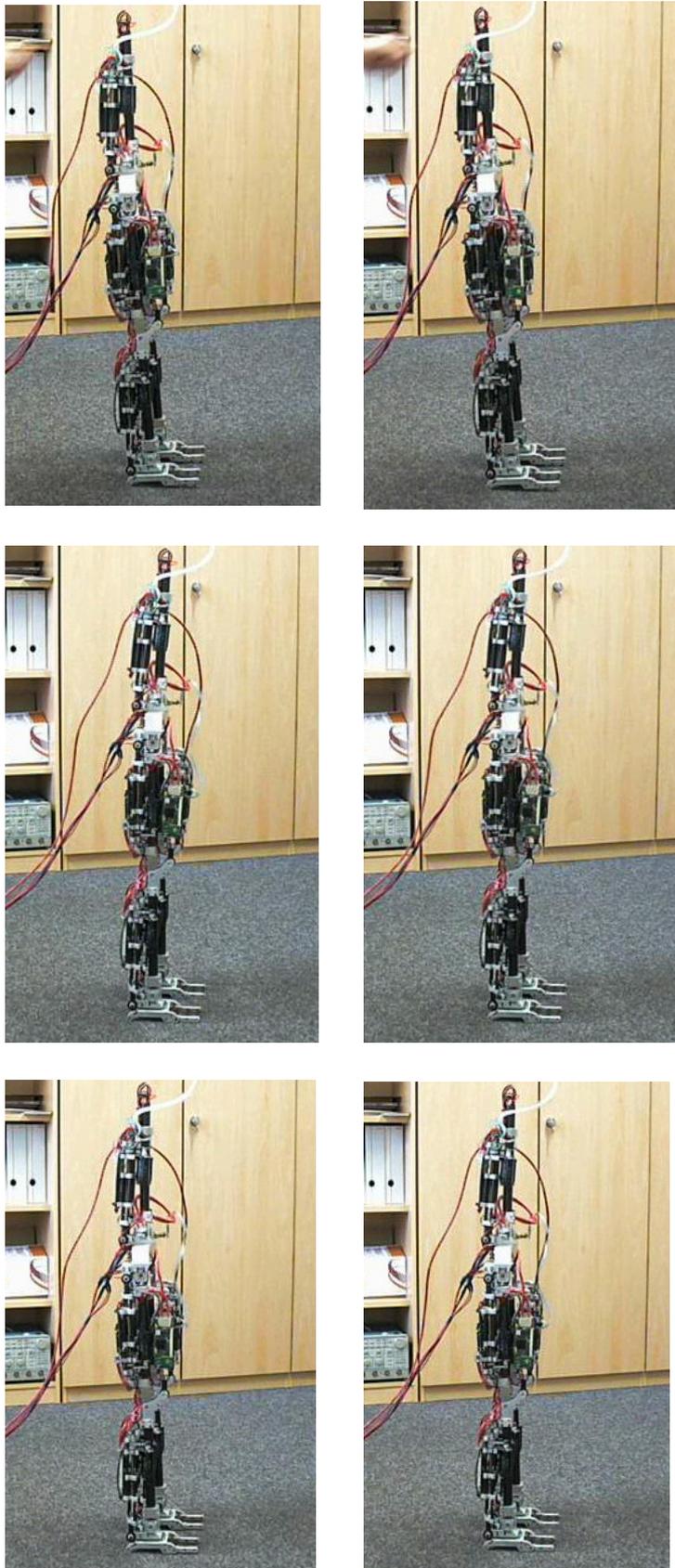


Abb. 6.2 – Bildsequenz: Stehen mit beiden Beinen

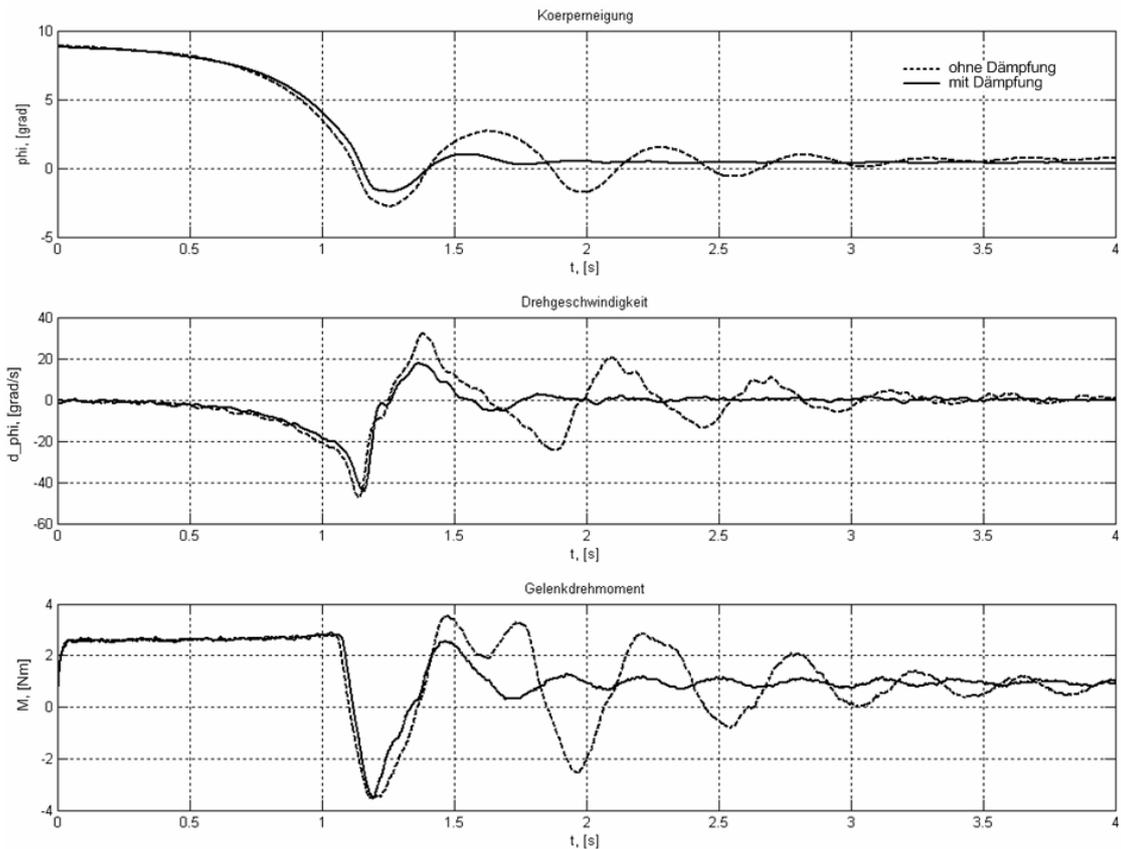


Abb. 6.3 –Experiment „Stehen mit beiden Beinen“ mit und ohne Dämpfung der Drehgeschwindigkeit des Roboterkörpers

6.2.2 Stehen auf einem Bein

Beim Stehen auf einem Bein wird das oben beschriebene Experiment für die sagittale und frontale Ebene wiederholt.

Abbildung 6.4 zeigt eine Bildsequenz des Experiments für die Fälle mit (rechts) und ohne (links) Regelung der Drehmomente im Fußgelenk. In Abbildungen 6.5 und 6.6 sind der Neigungswinkel und die Drehgeschwindigkeit des Roboterkörpers sowie der Drehmoment im Fußgelenk für beide Experimente vergleichend dargestellt.

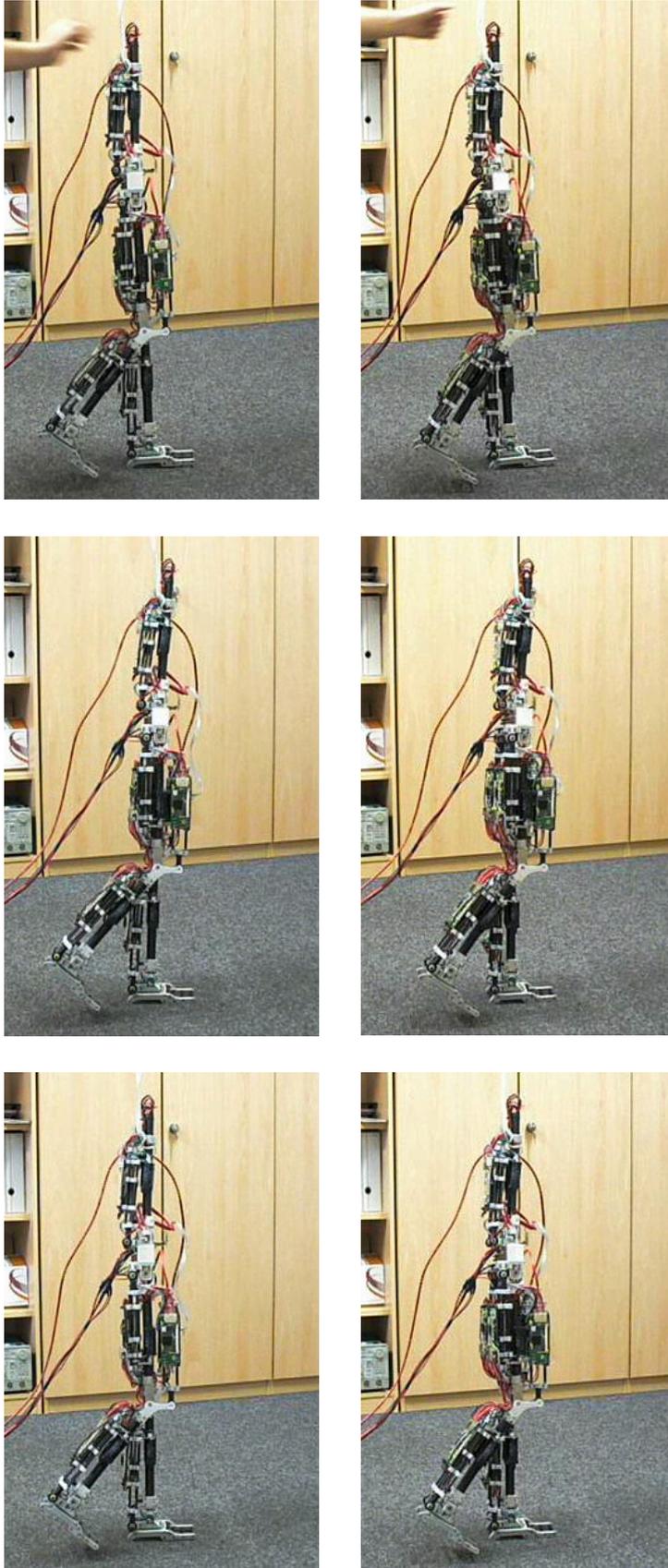


Abb. 6.4 – Bildsequenz: Stehen auf einem Bein (sagittale Ebene)

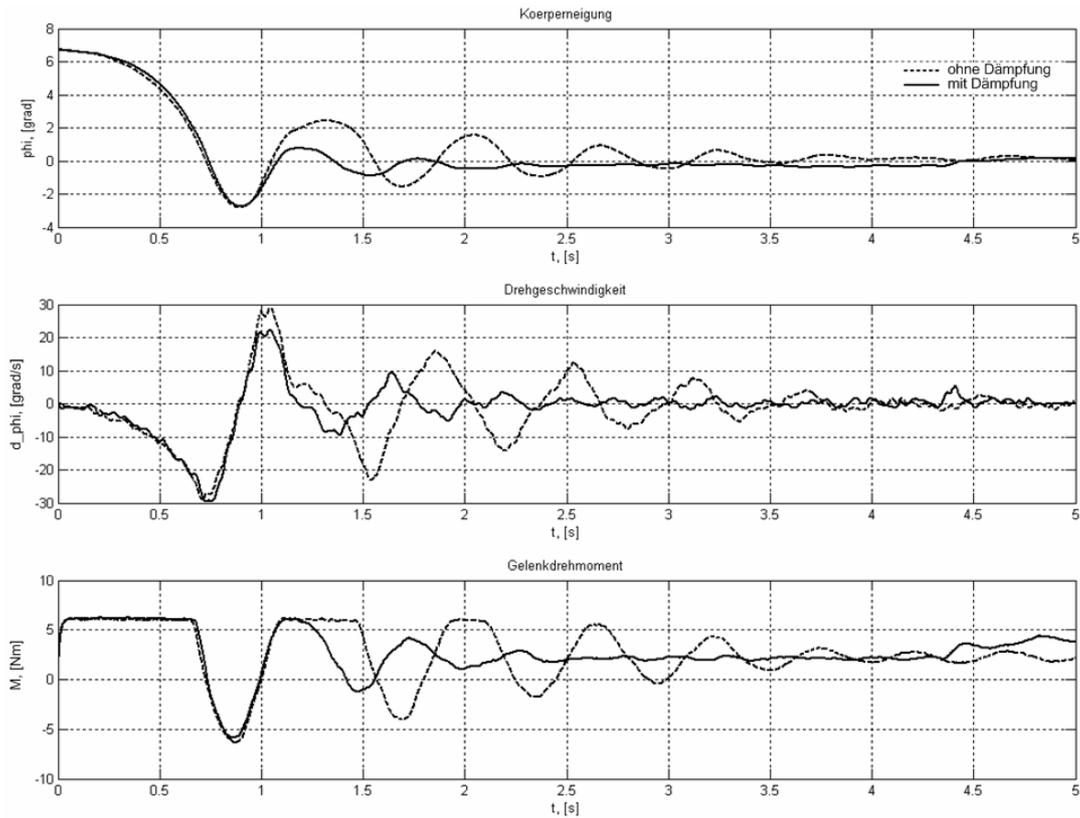


Abb. 6.5 – Experiment „Stehen auf einem Bein“ mit und ohne Dämpfung der Drehgeschwindigkeit des Roboterkörpers (sagittale Ebene)

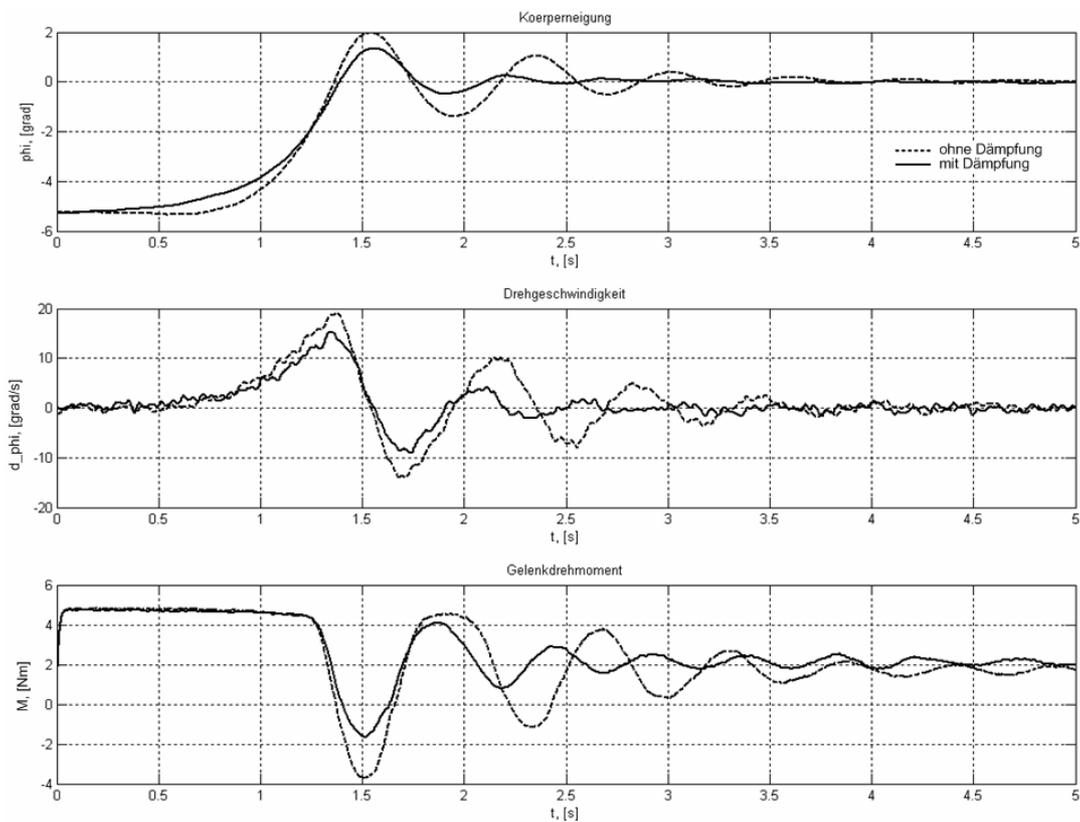


Abb. 6.6 – Experiment „Stehen auf einem Bein“ mit und ohne Dämpfung der Drehgeschwindigkeit des Roboterkörpers (frontale Ebene)

Im weiteren Verlauf des Experiments wird die Aufgabe der Stabilisierung des Massenmittelpunktes des Roboters beim Stehen auf einem Bein untersucht. Als eine Störung agiert dabei die Verlagerung des Massenmittelpunktes des Roboters durch unterschiedliche Auslenkung des freien Beins. Die Verlagerung des Massenmittelpunktes wird durch den sechs-komponenten Kraft-/ Drehmomentsensor im Stützbein als Verschiebung der Bodenreaktionskraft erfasst und muss durch eine Gleichgewichtsregelung in den Ursprungszustand kompensiert werden.

Abbildung 6.7 zeigt eine Bildsequenz des Experiments für die Fälle mit (rechts) und ohne (links) Stabilisierung des Massenmittelpunktes über die Drehmomente im Fußgelenk. Während des Experiments wird die Lage des freien Beins programmtechnisch alle zehn Sekunden verändert. Das führt dazu, dass der Massenmittelpunkt des Roboters in eine neue Position relativ zum auf dem Boden verbliebenen Roboterfuß verschoben wird. Die Verschiebung des Massenmittelpunktes wird bei aktiver Regelung über zusätzliche Drehmomente im Fußgelenk kompensiert. Die Projektion des Massenmittelpunktes wird somit in den Ursprung zurückgebracht. Bei inaktiver Regelung führt die Verschiebung des Massenmittelpunktes schnell zum Umkippen des Roboters, da die Projektion des Massenmittelpunktes den Fußrand erreicht und stabilen Bereich verlässt.

In Abbildung 6.8 sind die Gelenkwinkel des freien Beines, die horizontale Komponenten der Bodenreaktionskraft, die entsprechende Drehmomente im Fußgelenk des Stützbeines sowie die Position der Projektion des Massenmittelpunktes auf die Oberfläche für beide Experimente vergleichend dargestellt.

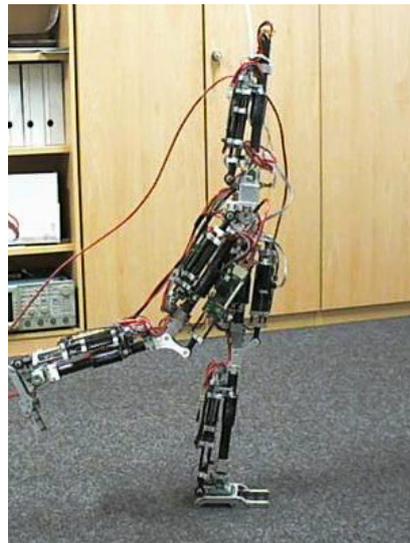
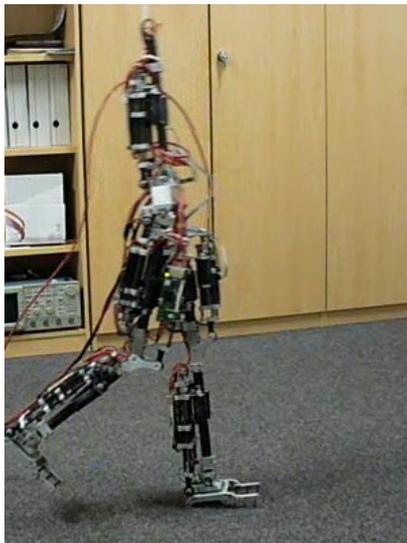
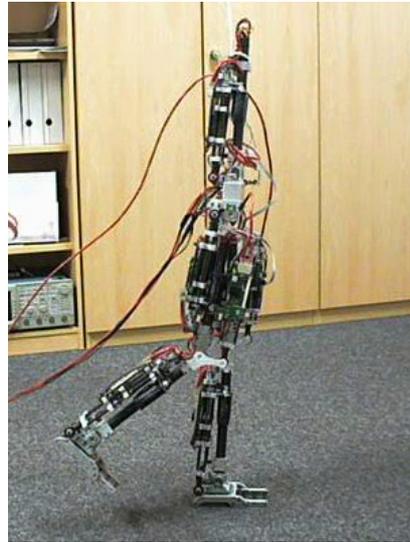
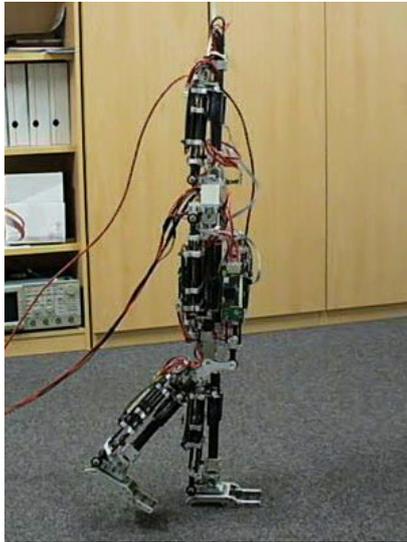
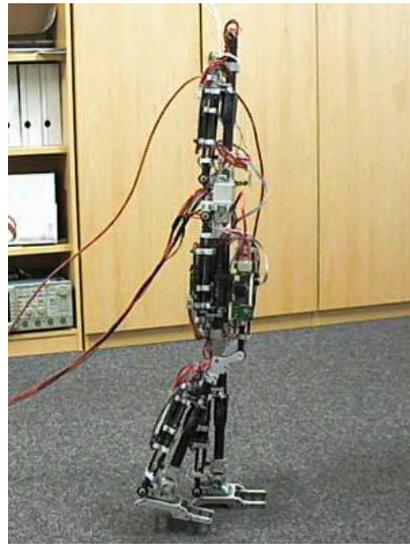
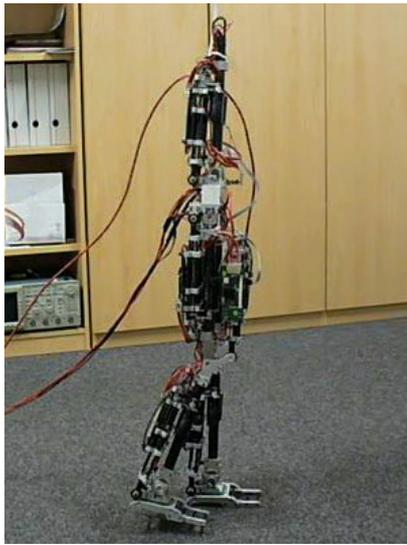


Abb. 6.7 – Bildsequenz: Stehen auf einem Bein

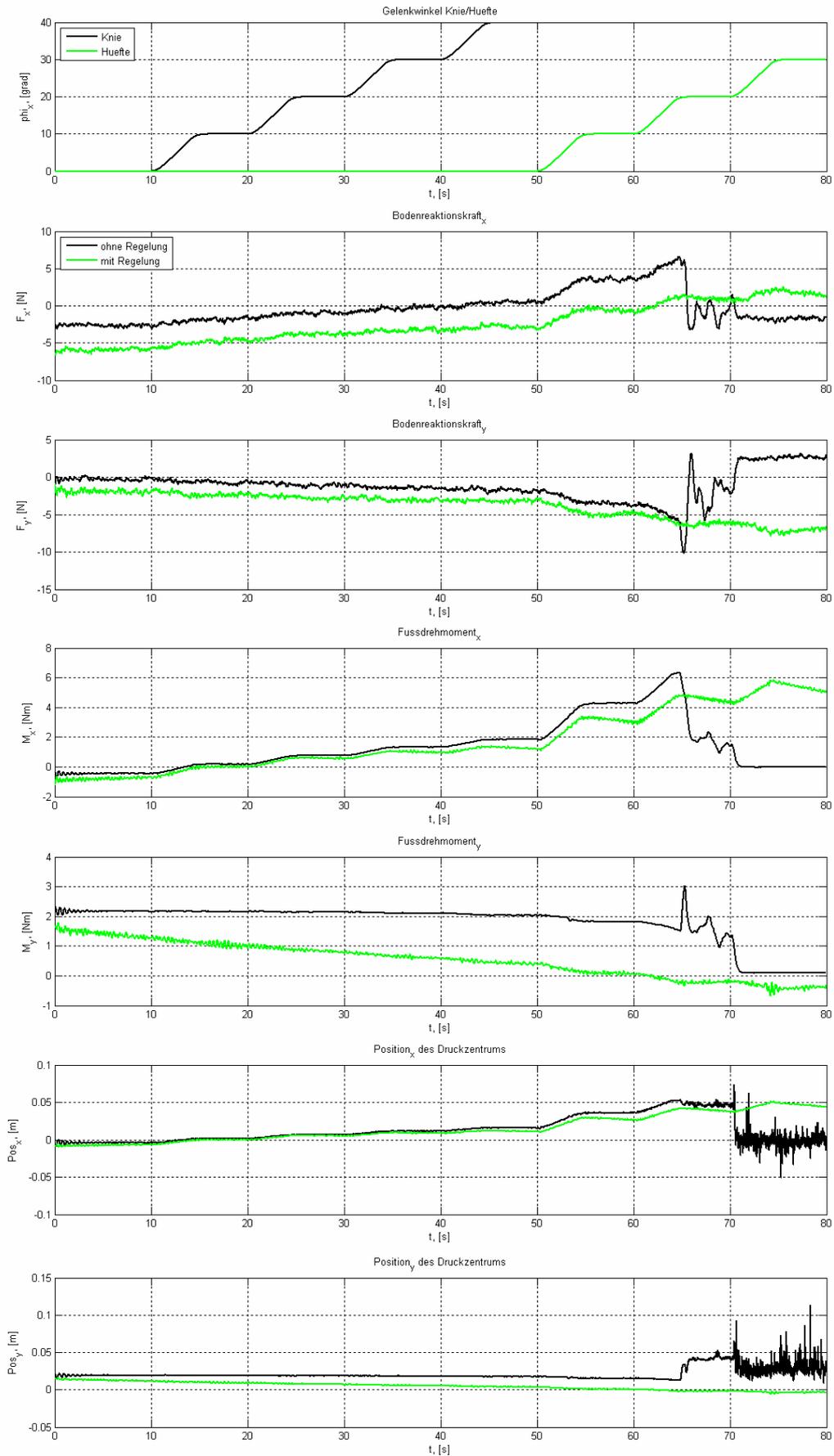


Abb. 6.8 – Experiment „Stehen auf einem Bein“ mit und ohne Stabilisierung des Massenmittelpunktes

6.3 Ballistische Bewegung des zweibeinigen Roboters ROTTO

Für dieses Experiment wurden die ballistischen Trajektorien für den zweibeinigen mobilen Roboter ROTTO entsprechend des im Kapitel 4 dargestellten Verfahrens generiert. Diese Trajektorien wurden im Laufe des Experiments durch die jeweiligen Gelenkregler abgearbeitet. Die hier dargestellten Ergebnisse wurden bei der Durchführung einer ballistischen Bewegung in sagittaler Ebene aufgenommen. Eine dreidimensionale ballistische Bewegung wurde ebenfalls getestet und unterscheidet sich von der Bewegung in sagittaler Ebene durch zusätzliche angesteuerte Freiheitsgrade in Fuß-, Hüft- und Körpergelenken.

6.3.1 Messung

In Abbildungen 6.9 bis 6.14 sind die gemessenen Werte für die entsprechenden Gelenke des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO dargestellt.

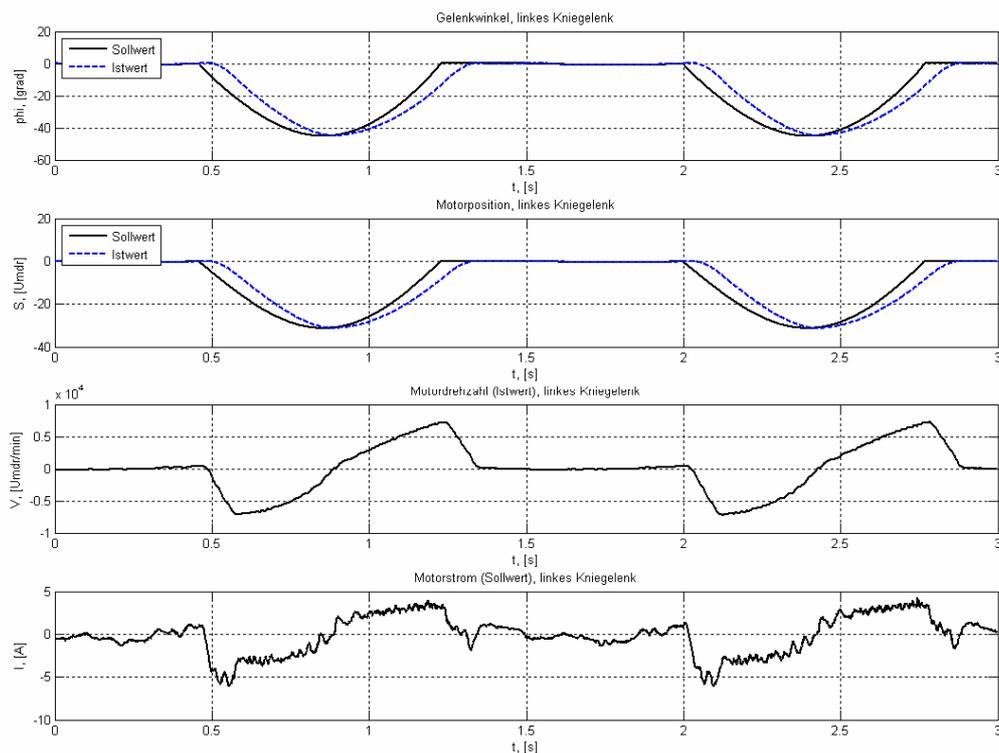


Abb. 6.9 – Experiment „ballistische Bewegung“; Messwerte für das linke Kniegelenk

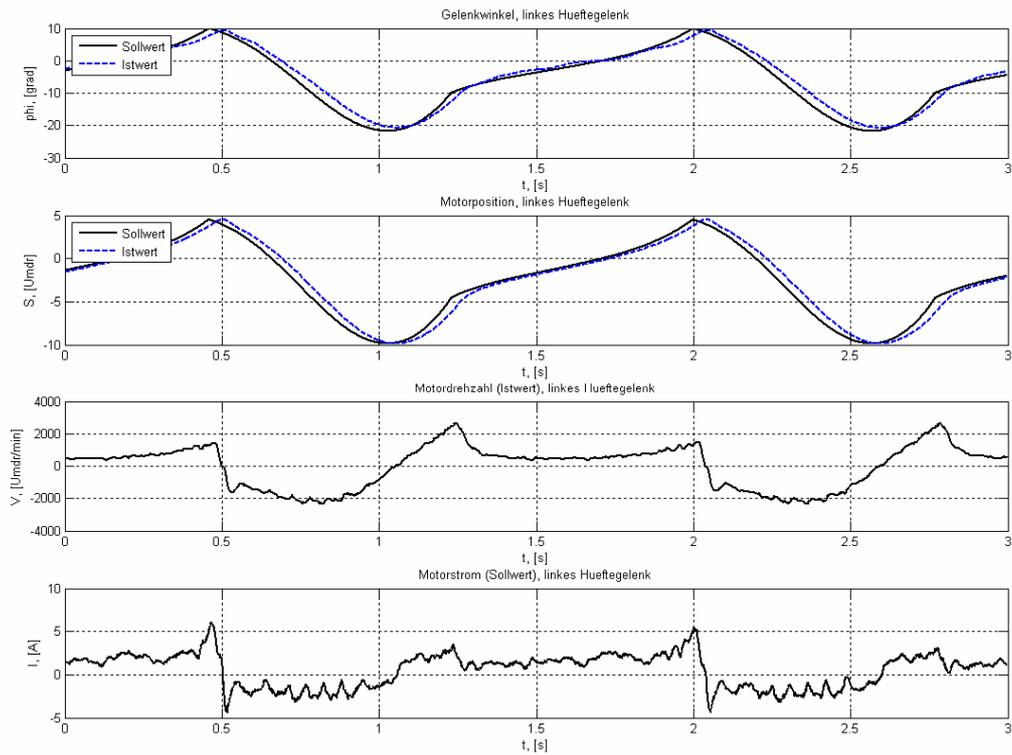


Abb. 6.10 – Experiment „ballistische Bewegung“; Messwerte für das linke Hüftgelenk

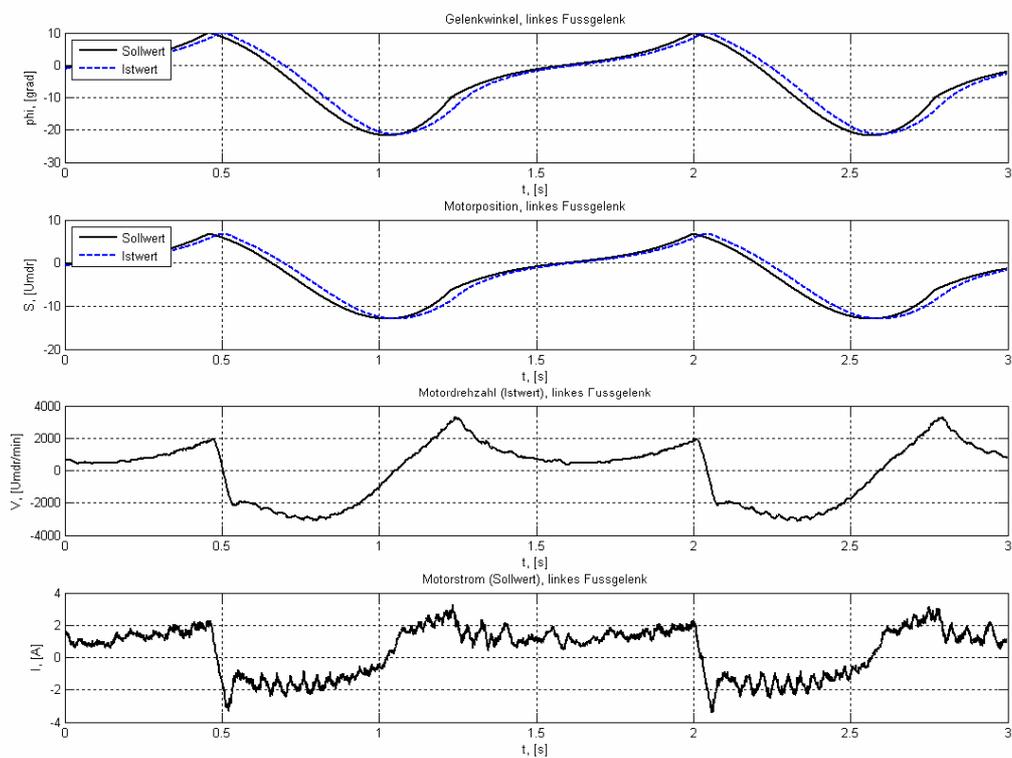


Abb. 6.11 – Experiment „ballistische Bewegung“; Messwerte für das linke Fußgelenk

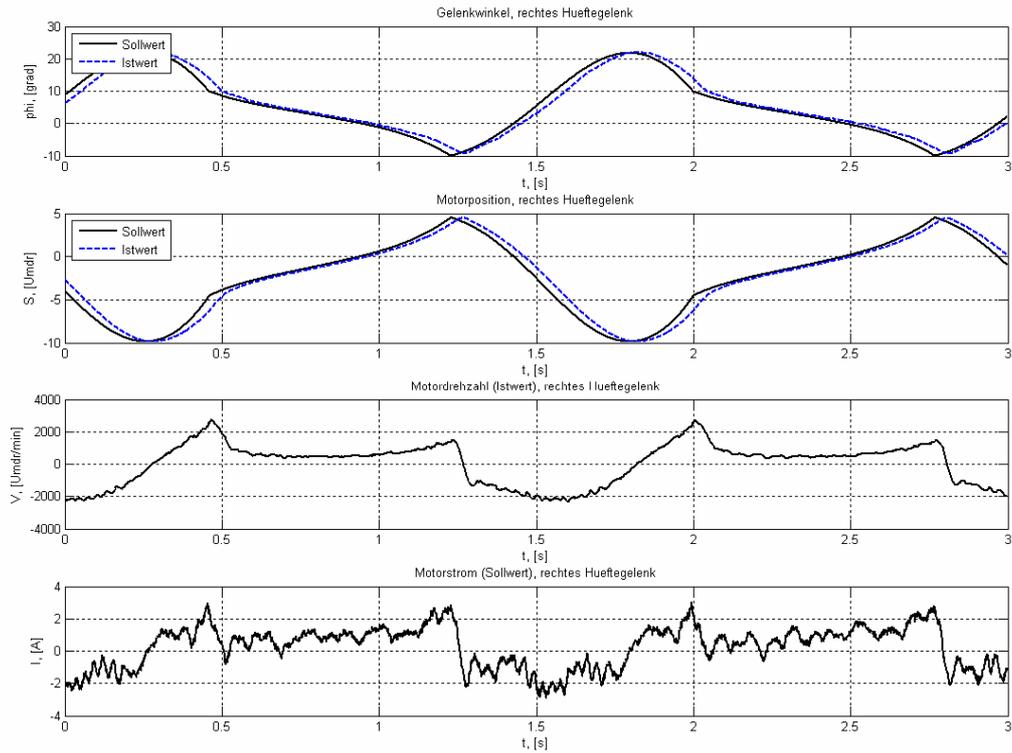


Abb. 6.12 – Experiment „ballistische Bewegung“; Messwerte für das rechte Hüftgelenk

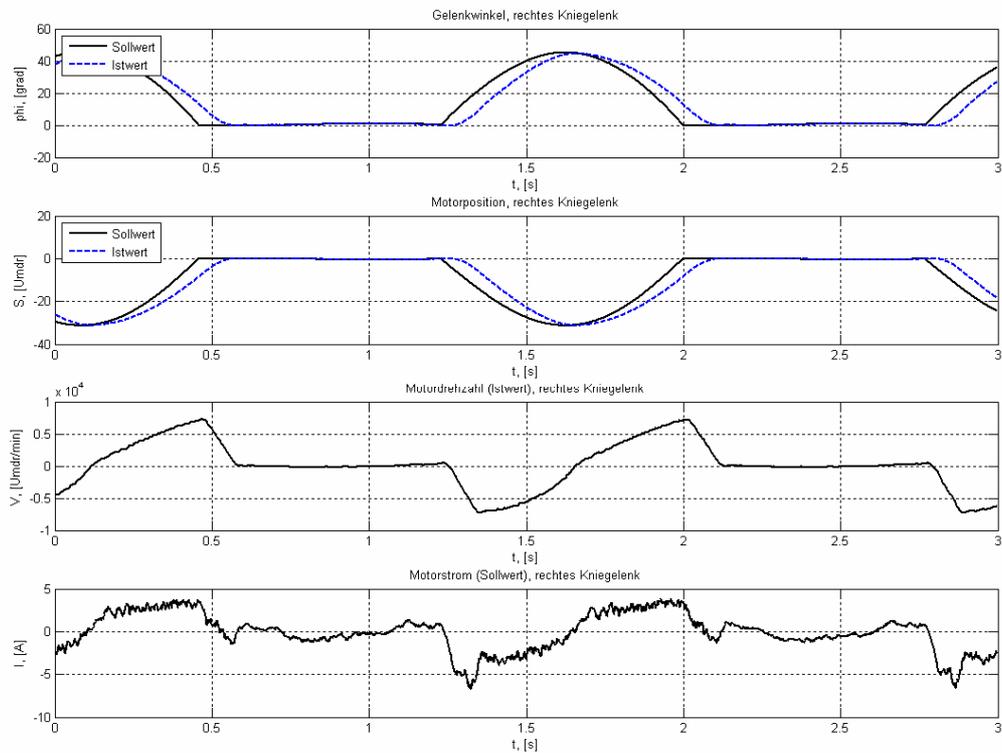


Abb. 6.13 – Experiment „ballistische Bewegung“; Messwerte für das rechte Kniegelenk

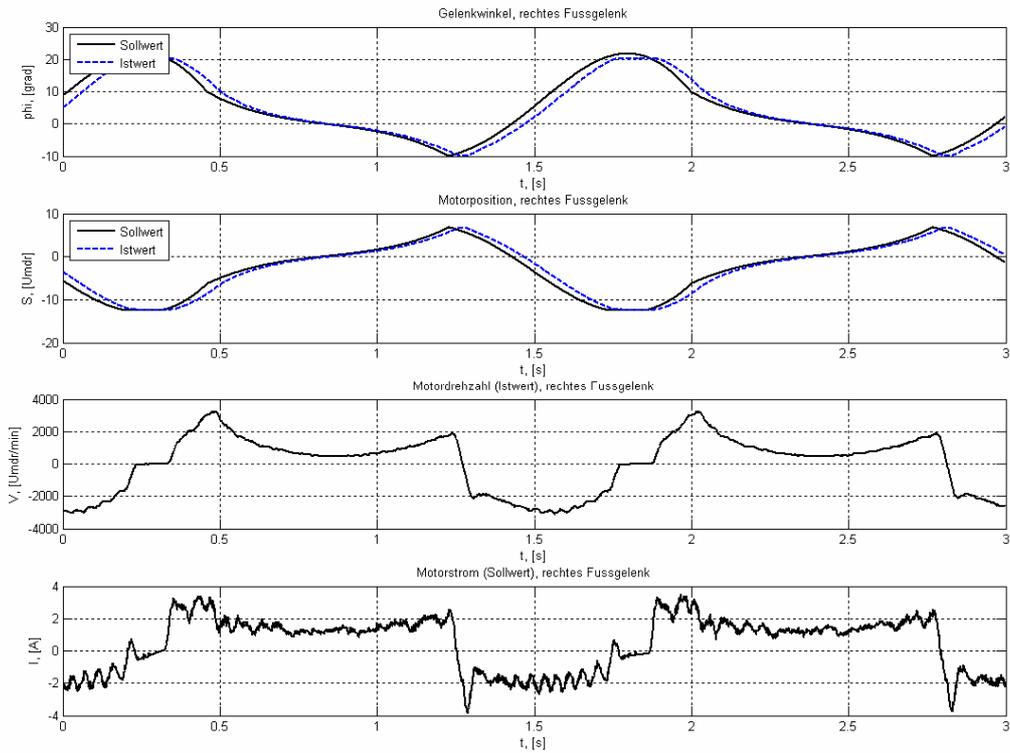


Abb. 6.14 – Experiment „ballistische Bewegung“; Messwerte für das rechte Fußgelenk

6.3.2 Bildsequenz: ballistische Bewegung

In Abbildung 6.15 ist eine Bildsequenz der ballistischen Bewegung des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO dargestellt. Anhand der Bildsequenz ist eine menschenähnliche Bewegung erkennbar.

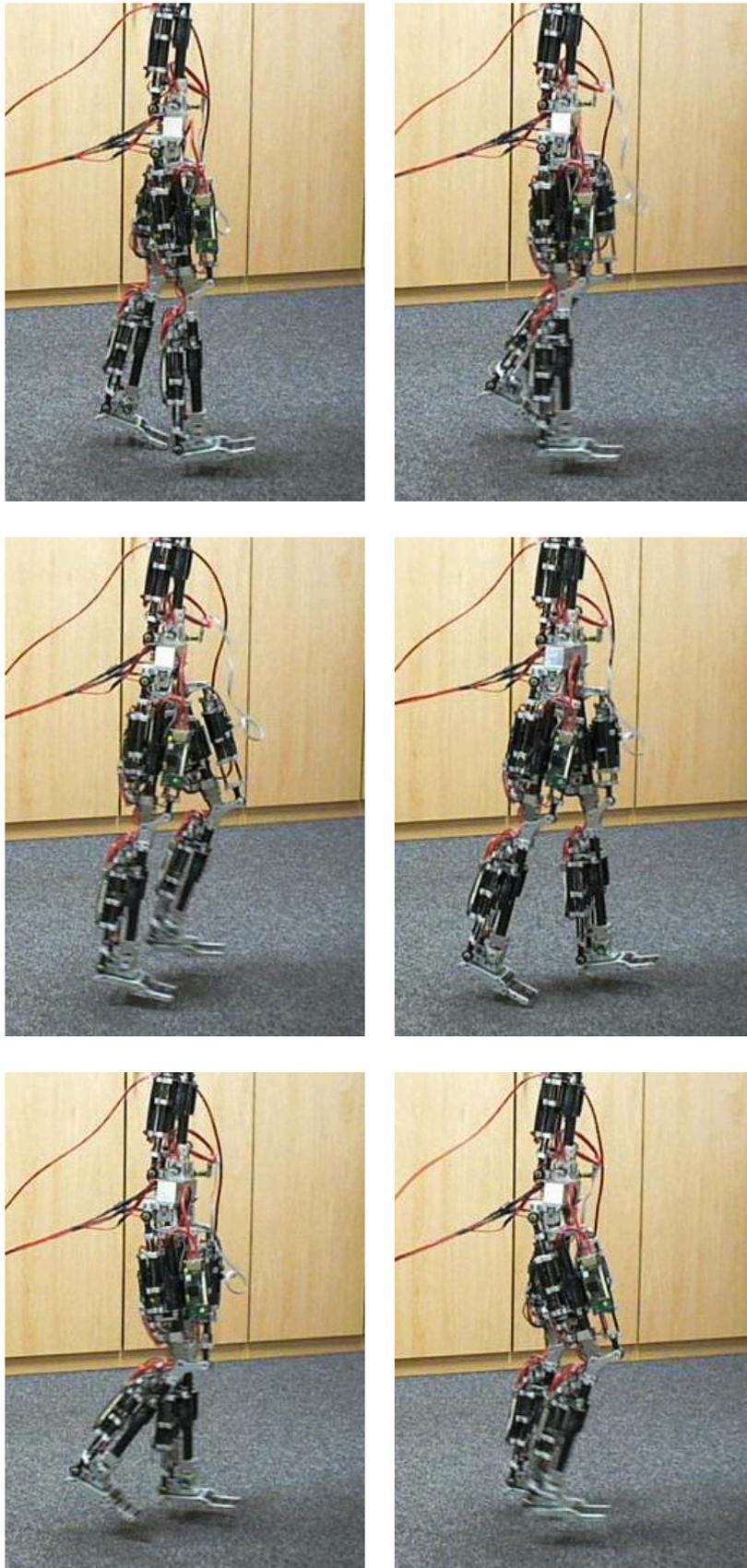


Abb. 6.15 – Bildsequenz: ballistische Bewegung des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO

6.4 Zusammenfassung

Die oben dargestellten experimentellen Untersuchungen der Lokomotions- und Stabilisierungsaufgaben am Beispiel von Experimenten „Still Stehen“, „Gleichgewicht erhalten“ und „ballistisch Gehen“ haben bewiesen, dass die ausgewählten Steuerungsmethoden zur Generierung der Bewegungstrajektorien für mobile Schreitroboter geeignet sind.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit wurde der Konstruktion und Steuerung von mobilen Schreitrobotern gewidmet und befasst sich mit dem systematischen Ansatz zu deren Entwicklung.

Für den Entwurf mechatronischer Systeme wurden verschiedene Methoden dargestellt und bewertet. Die diskutierten Entwurfsschritte wurden bei der Entwicklung der dargestellten mehr- und zweibeinigen mobilen Roboter angewendet. Bei dem bevorzugten „concurrent engineering“ Verfahren wurden moderne Rechen- und Softwaretools in allen Bereichen der Systementwicklung stark einbezogen. Auslegung der Konstruktion, Auswahl, Dimensionierung und Entwicklung der Antriebskomponenten wurden in mehreren Optimierungsschritten auf Basis der Simulationsergebnisse verfeinert. Für die Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Roboter wurden Simulationsmodelle unterschiedlicher Komplexität entwickelt. Während der Entwicklung einzelner Roboterkomponenten wurden sowohl konstruktive Anforderungen, wie hohe Modularität, Erweiterbarkeit und einfache Fertigung, als auch funktionelle Anforderungen, wie Material- und Energieeffizienz, Maximierung des Arbeitsbereiches usw., angelegt und auch eingehalten. Das vorgestellte Verfahren hat es möglich gemacht, die Roboterentwicklung innerhalb relativ kurzer Zeit bis zu einem Funktionsprototyp voranzubringen.

Aus funktioneller Sicht ist zu erwähnen, dass sich die entworfenen Roboterkonstruktionen durch einfache, aber dennoch für die Lokomotionsaufgaben ausreichende Kinematiken mit optimalen Verhältnissen und größeren Arbeitsbereichen auszeichnet. Die Arbeitsweise und Platzierung der Antriebseinheiten ist sehr anthropomorph. Die elektrischen Antriebe sind sehr effizient im Bezug auf Kosten, Energieverbrauch und Leistungsdichte ausgelegt. Die integrierte Sensorik erfasst alle zur Lokomotion notwendigen Informationen, wie Körperkonfiguration, künstliche Gleichgewichtssensor und Bodenreaktionskräfte.

Dank dem systematischen, iterativen Entwicklungsansatz lässt sich behaupten, dass die Roboter, sowohl mehrbeiniger als auch zweibeiniger, von allen Seiten optimal entwickelt worden sind. Der zweibeinige Roboter folgt im Großen und Ganzen den anthropomorphen

Verhältnissen und ist in der Lage Aufgaben, wie hochdynamisches Gehen, Laufen, Kniebeugen, Aufstehen usw., durchzuführen.

Neben dem systematischen Entwurf der mobilen Roboter wurde ein hierarchisches Steuerungssystem entwickelt, das sich sehr effizient sowohl für einen sechsbeinigen, mobilen Roboter als auch für einen zweibeinigen, mobilen Roboter erwies. Die vorgeschlagene technische Lösung zum Aufbau des Steuerungssystems basiert auf vernetzten Antriebseinheiten, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt worden sind. Zu den wichtigsten Eigenschaften dieses Konzepts gehören hohe Flexibilität und Erweiterbarkeit sowie ein leistungsfähiges Kommunikationssystem zwischen den einzelnen Einheiten. Die Verwendung eines Kommunikationssystems ermöglichte die Realisierung neuer Regelungskonzepte, bei dem alle Teile des Steuerungs- bzw. Regelungssystems auf den Zentralrechner verlagert worden sind. Die Regelungsschleifen wurden komplett über den Bus geschlossen, wobei die Zykluszeit nicht mehr als 100 μ s betrug. Das resultierte in einem exzellenten Synchronismus der betroffenen Antriebe und einer schneller Realisierung und Prüfung verschiedener Regelungskonzepte. Die dargestellte Inbetriebnahme des Steuerungssystems und dessen quantitative Untersuchungen insbesondere für die Steuerung/Regelung dreiphasiger Elektromotoren beweisen die hohe Güte des gesamten Steuerungssystems sowie dessen einzelner Komponenten.

Der Entwicklung eines Verfahrens zur Generierung der Raumbewegung der komplexen Robotersysteme wurde ein großer Teil der Arbeit gewidmet. Anhand eines simplen Modells wurden zunächst die Grundlagen der Berechnung ballistischer Raumbewegung beschrieben und untersucht. Allgemein kann die Bewegung des Roboters in zwei aufeinander folgenden Phasen unterteilt werden. Jede Einzelstützphase der Bewegung endet mit dem Anstoß des vorschwingenden Beins auf den Untergrund. Während der darauf folgenden Doppelstützphase findet ein Wechsel des Stützbeines statt. Diese Phase ist sehr kurz und wird als momentane betrachtet. Mit einer neuen Einzelstützphase wird der nächste Bewegungsschritt eingeleitet. Aufgrund der Abwesenheit der ansteuernden Kräfte bzw. Drehmomente während der Bewegung wird diese als freie „ballistische“ Bewegung betrachtet. Die ansteuernden Drehmomente wirken lediglich während der Doppelstützphase an die Robotergelenke und werden mathematisch in Form impulsiver Einwirkung (Delta-Fuktion) beschrieben. Auf die Fragestellung der Generierung der ballistischen Raumbewegung wurde als Lösung der Randwertaufgabe für ein Gleichungssystem, das die Roboterbewegung während der Einzelstützphase darstellt, eingegangen. Dieses Verfahren wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit für komplexe mechanische Systeme am Beispiel eines zweibeinigen mobilen Roboters mit großer Anzahl von Freiheitsgrade erweitert.

Die resultierenden Trajektorien weisen große Ähnlichkeit mit der Bewegung des Menschen auf. Unter Berücksichtigung der Roboterdynamik während der Generierung der ballistischen Trajektorien und der Abwesenheit der ansteuernden Kräfte während der ballistischen Bewegung des Mechanismus wurde über die Energieeffizienz dieser Trajektorien gesprochen. Dennoch wurden diese Trajektorien lediglich für ein mechanisches System berechnet und sind für die direkte Umsetzung in einem zweibeinigen mobilen Roboter nur bedingt geeignet. Da der zweibeinige, mobile Roboter ROTTO mit Hilfe von elektrischen Antrieben bewegt wird, wurde bei der Berechnung der ballistischen Trajektorien zusätzlich das Trägheitsmoment der Antriebe berücksichtigt. Anhand der simulativen und experimentellen Ergebnisse wurde das vorgeschlagene Verfahren sowohl an mehreren Modellen als auch an einem realen Prototyp des zweibeinigen mobilen Roboters erfolgreich erprobt.

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit ergaben sich wesentliche Grenzen des dargestellten Verfahrens durch den hohen Rechenaufwand für eine Berechnung der ballistischen Trajektorien in Echtzeit. Diese Grenzen sind durch die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Gesamtdynamik des Systems zu begründen. Für die experimentelle Erprobung an einem realen Prototyp wurden die dargestellten ballistischen Trajektorien daher im Voraus berechnet.

Die Kraftwechselwirkung im Kontakt zwischen dem Roboterfuß und der Oberfläche spielt eine besondere Rolle bei der Analyse der dynamischen Eigenschaften des Systems. Da die Roboterfüße keine Zugkraft im Bezug auf den Untergrund erzeugen können, handelt es sich in diesem Fall um eine einseitige Krafteinwirkung. Die Aussagen bezüglich des statischen und dynamischen Verhaltens des Robotersystems wurden durch verschiedene Bodenbezugspunkte definiert und verglichen sowie verschiedene Methoden zu deren Abschätzung aufgezeigt. Solche Aussagen liefern Information über die Bodenreaktionskraft unter dem Roboterfuß und stehen bei der Erarbeitung der Maßnahmen zur Erhaltung des Gleichgewichts zur Hilfe.

Der Roboter kann lediglich über die Kraft unter dem Fuß/unter den Füßen auf die Oberfläche einwirken, um eine Verlagerung bzw. Auslenkung des Vektors der gesamten Bodenreaktionskraft auszulösen. Die Verlagerung bzw. Auslenkung des Vektors der gesamten Bodenreaktionskraft wird notwendig, um die gewünschte Kraft im Massenmittelpunkt zu erzeugen. Die Kraft im Massenmittelpunkt beschleunigt diesen in die gewünschte Richtung. Die Fähigkeit des Roboters, den Massenmittelpunkt zu beschleunigen, ist jedoch durch die erhebliche Massenträgheit des Systems sowie das eingeschränkte Vermögen ausreichend große Reaktionskräfte zu erzeugen, begrenzt. Eine inkorrekte oder ungenügende Behandlung dieser Eigenschaft führt sehr schnell zum Gleichgewichtsverlust.

Basierend auf den im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeiteten Methoden wurde ein Konzept zum Aufbau der mittleren Schicht (Primitive Level) des Steuerungssystems präsentiert und erläutert. Dieses Konzept hat das Ziel, die gewünschte Fortbewegung des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO zu ermöglichen. Dabei wird die Fortbewegung des Roboters lediglich über die Geschwindigkeit seines Massenmittelpunktes gesteuert. Alle notwendigen Aufgaben der Generierung der Bewegungstrajektorien sowie der Gleichgewichtserhaltung werden komplett in der mittleren Schicht (Primitive Level) des Steuerungssystems abgewickelt.

Die in der vorliegenden Arbeit dargestellten Konzepte und Verfahren wurden in simulativen und praktischen Experimenten untersucht. Die repräsentativen Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im letzten Kapitel dargelegt.

Die entwickelten Prototypen der sechsbeinigen bzw. zweibeinigen mobilen Roboter stellen zukünftig somit eine solide Testplattform für verschiedene Steuerungs- und Regelungsstrategien dar.

7.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit behandelte schwerpunktmäßig die Problemstellungen der Realisierung von mobilen Schreitrobotern und deren Steuerungssysteme. Durch die Entwicklung und Verwendung von hoch entwickelten Systemkomponenten, sind die vorgestellten, mobilen Schreitroboter anderen aktuellen Prototypen weltweit bereits in vielerlei Hinsichten überlegen. Damit stellen die vorgestellten, mobilen Schreitroboter eine solide Grundlage für die Entwicklung weiterer leistungsfähiger Schreitroboter dar.

Bei der Entwicklung von Antriebseinheiten für den zweibeinigen mobilen Roboter ROTTO wurde eine Analyse des Leistungsgewichts der am Markt verfügbaren Motoren durchgeführt. Es wurden bürstenlose Antriebe aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit und Wartungsfreiheit ausgewählt. Eine weitere Steigerung der Leistungsdichte und Optimierung des Bauraumes sowie eine geringere Verlustleistung könnte z. B. durch die Verwendung von gehäuselosen permanentmagnet erregten Synchronmotoren erzielt werden. Zusammen mit einem modernen Kommunikationssystem und präzisen Sensoren können optimierte drehmomentgeregelter Antriebssysteme entwickelt werden.

In Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die für eine effiziente Ansteuerung des Roboters relevante Grundfunktionen vorgeschlagen und erprobt.

Es wurde festgestellt, dass die beschriebene Methode zur Generierung der ballistischen Trajektorien weitere Optimierungspotenziale mit der Einführung von verschiedenen Gütefunktionen wie minimale Gelenkdrehmomente oder minimale kinetische Energie aufweist.

Die Generierung der ballistischen Trajektorien erfolgt aktuell nicht in Echtzeit. Dennoch lässt kontinuierliche Steigerung der Rechenleistung moderner Prozessoren sowie Nutzung der Rechenleistung moderner Grafikprozessoren (GPGPU) hoffen, dass diese Aufgabe in Kürze auch in Echtzeit realisierbar wird.

Da sich zweibeinige, mobile Roboter am besten für die menschliche Umgebung eignen und eine erhöhte Akzeptanz im menschlichen Umfeld finden, wird an der Entwicklung solcher Roboter weltweit mit Hochdruck gearbeitet. Das trägt zum besseren Verständnis von menschlichem Gehen bei und ermöglicht die Verbesserung solcher Mechanismen wie Prothese und Exoskeletten. Dennoch ist für den Einsatz solcher Roboter in einer Umgebung zusammen mit Menschen weitere Entwicklung und Erforschung der Intelligenz, der Fähigkeit zu sprechen und zu verstehen sowie die Ausstattung der Roboter mit Greif- und Sichtsystemen notwendig. Die Aspekte der Energieversorgung von Robotern sind ebenfalls von großem Interesse, damit ihnen eine gewisse Autonomie gewährleistet werden kann. Als äußerst wichtig erscheint auch die Erarbeitung und Prüfung verschiedener Design- und Sicherheitskonzepte mit dem Ziel zukünftiger Einsetzbarkeit der Roboter in menschlicher Umgebung.

Anhang A

Technische Daten und Parameter

In den nachfolgenden Tabellen sind die wichtigsten technischen Daten der Roboter zusammengefasst.

Tabelle A.1 Technische Daten

	Roboter ANTON	Roboter ROTTO
Masse [kg]	6.95	12.01
Abmessungen [HxBxT, mm]	220x460x750	1032x300x180
Anzahl Gelenke	24	12
Max. Geschwindigkeit [km/h]	1,5	n.v.

Die kinematischen Maße des sechsbeinigen mobilen Roboters ANTON sowie des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO sind in Abb. A.1 und A.2 dargestellt. Die für die Erstellung des Robotermodells relevante Massen- und Trägheitsdaten der einzelnen Körper werden weiter unten detailliert angegeben.

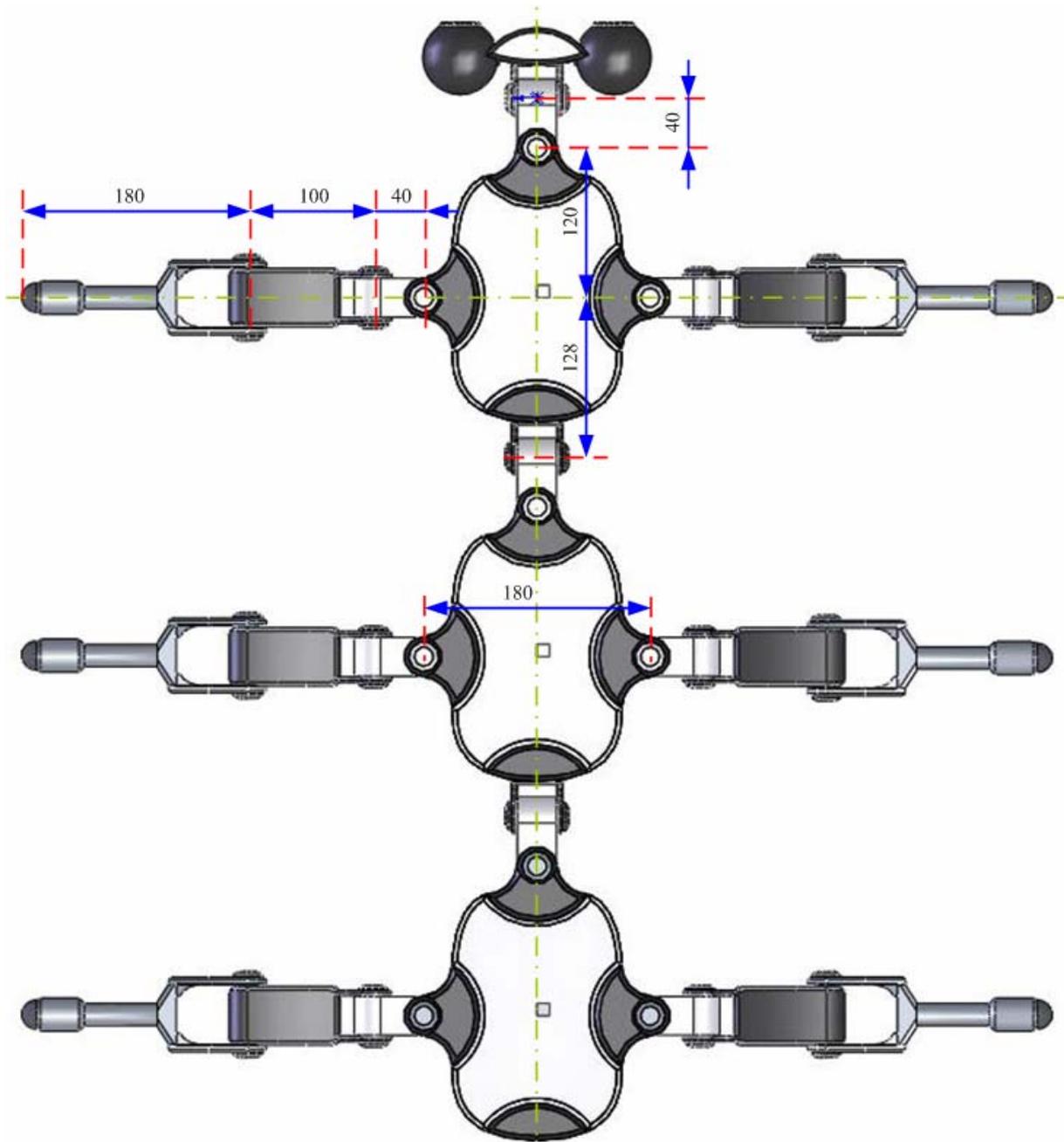


Abb. A.1 – Abmessungen des sechsbeinigen mobilen Roboters ANTON

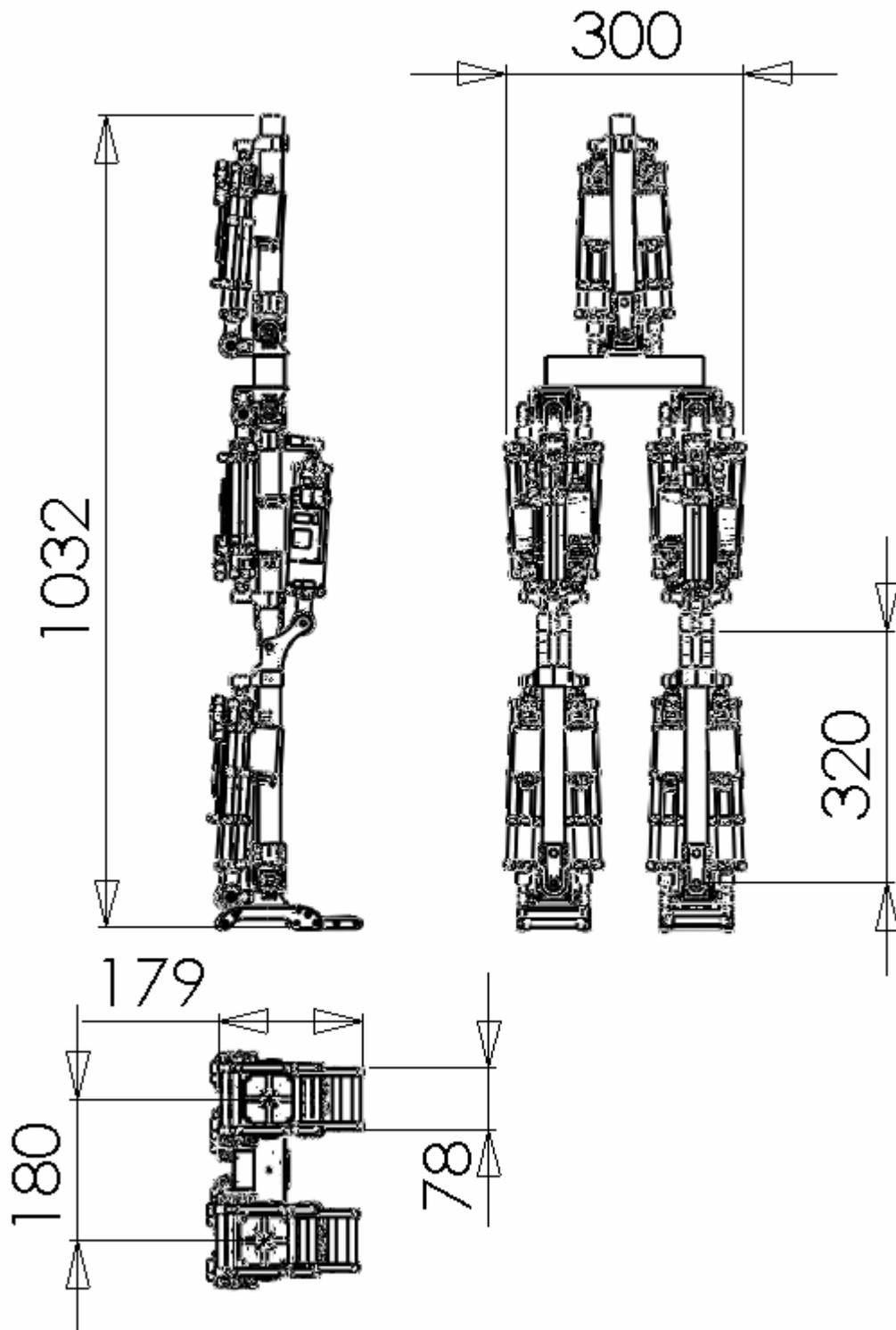
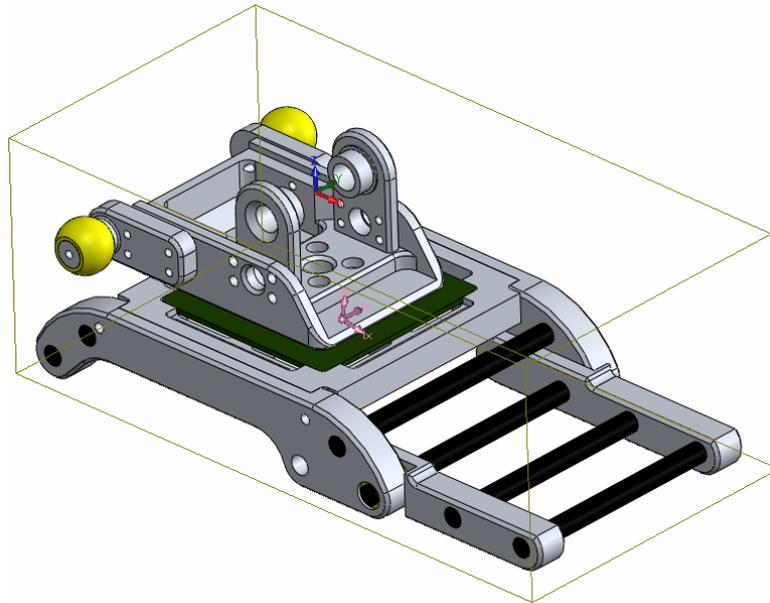


Abb. A.2 – Abmessungen des zweibeinigen mobilen Roboters ROTTO

Fuß



Masse = 377.69 Gramm

Massenmittelpunkt: (Millimeter)

$$X = 8.26$$

$$Y = 0.00$$

$$Z = -35.74$$

Hauptachsen der Trägheit und Hauptträgheitsmomente:(Gramm x Millimeter²)

Am Massenmittelpunkt genommen.

$$I_x = (0.99, 0.00, -0.17) \quad P_x = 379702.84$$

$$I_y = (0.00, 1.00, 0.00) \quad P_y = 755462.02$$

$$I_z = (0.17, 0.00, 0.99) \quad P_z = 1046717.84$$

Trägheitsmomente: (Gramm x Millimeter²)

Bezogen auf den Massenmittelpunkt, ausgerichtet auf das Ausgabekoordinatensystem

$$L_{xx} = 399028.96 \quad L_{xy} = -0.23 \quad L_{xz} = -111880.82$$

$$L_{yx} = -0.23 \quad L_{yy} = 755462.02 \quad L_{yz} = 0.13$$

$$L_{zx} = -111880.82 \quad L_{zy} = 0.13 \quad L_{zz} = 1027391.72$$

Trägheitsmomente: (Gramm x Millimeter²)

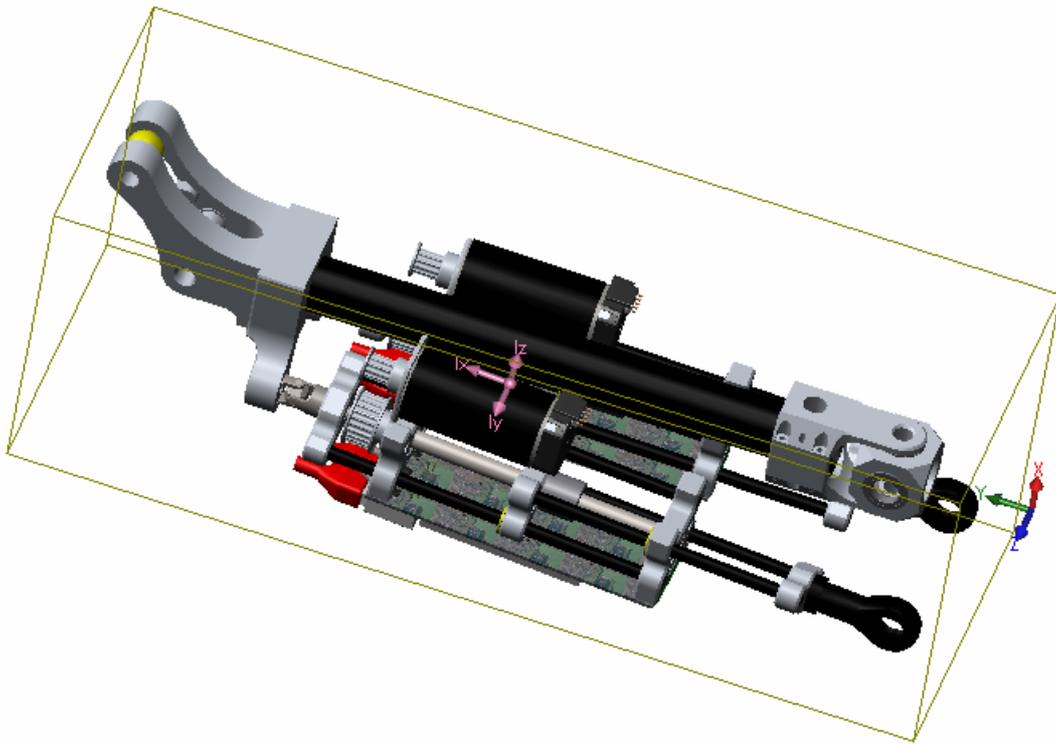
Genommen vom Ausgabekoordinatensystem

$$I_{xx} = 881580.51 \quad I_{xy} = -0.17 \quad I_{xz} = -223366.28$$

$$I_{yx} = -0.17 \quad I_{yy} = 1263770.41 \quad I_{yz} = -0.10$$

$$I_{zx} = -223366.28 \quad I_{zy} = -0.10 \quad I_{zz} = 1053148.57$$

Unterschenkel



Masse = 1633.65 Gramm

Massenmittelpunkt: (Millimeter)

X = -20.37

Y = 221.20

Z = 0.18

Hauptachsen der Trägheit und Hauptträgheitsmomente: (Gramm x Millimeter²)

Am Massenmittelpunkt genommen

$I_x = (0.07, 1.00, 0.00)$ $P_x = 2559651.53$

$I_y = (-0.11, 0.01, 0.99)$ $P_y = 8900648.51$

$I_z = (0.99, -0.07, 0.11)$ $P_z = 9564796.52$

Trägheitsmomente: (Gramm x Millimeter²)

Bezogen auf den Massenmittelpunkt, ausgerichtet auf das Ausgabekoordinatensystem

$L_{xx} = 9524184.55$ $L_{xy} = 475741.08$ $L_{xz} = -72436.12$

$L_{yx} = 475741.08$ $L_{yy} = 2592153.29$ $L_{yz} = 10180.51$

$L_{zx} = -72436.12$ $L_{zy} = 10180.51$ $L_{zz} = 8908758.71$

Trägheitsmomente: (Gramm x Millimeter²)

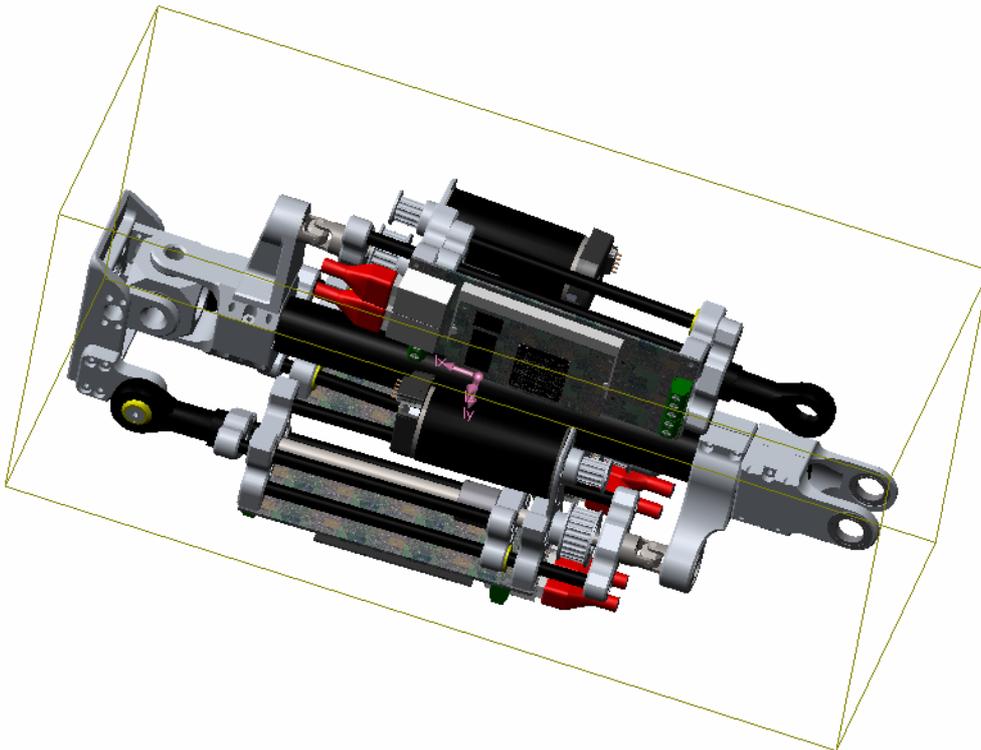
Genommen vom Ausgabekoordinatensystem

$I_{xx} = 89454652.29$ $I_{xy} = -6886889.94$ $I_{xz} = -78520.17$

$I_{yx} = -6886889.94$ $I_{yy} = 3270401.98$ $I_{yz} = 76230.37$

$I_{zx} = -78520.17$ $I_{zy} = 76230.37$ $I_{zz} =$ = 89517365.98

Oberschenkel



Masse = 2392.93 Gramm

Massenmittelpunkt: (Millimeter)

X = 1.71

Y = 524.99

Z = -3.20

Hauptachsen der Trägheit und Hauptträgheitsmomente:(Gramm x Millimeter²)

Am Massenmittelpunkt genommen

I_x = (0.05, 1.00, -0.00) P_x = 5162172.46

I_y = (-0.97, 0.05, 0.22) P_y = 11997333.08

I_z = (0.22, -0.01, 0.97) P_z = 13272608.97

Trägheitsmomente: (Gramm x Millimeter²)

Bezogen auf den Massenmittelpunkt, ausgerichtet auf das Ausgabekoordinatensystem

L_{xx} = 12042228.47 L_{xy} = 361295.62 L_{xz} = -278208.15

L_{yx} = 361295.62 L_{yy} = 5181153.93 L_{yz} = 6301.41

L_{zx} = -278208.15 L_{zy} = 6301.41 L_{zz} = 13208732.09

Trägheitsmomente: (Gramm x Millimeter²)

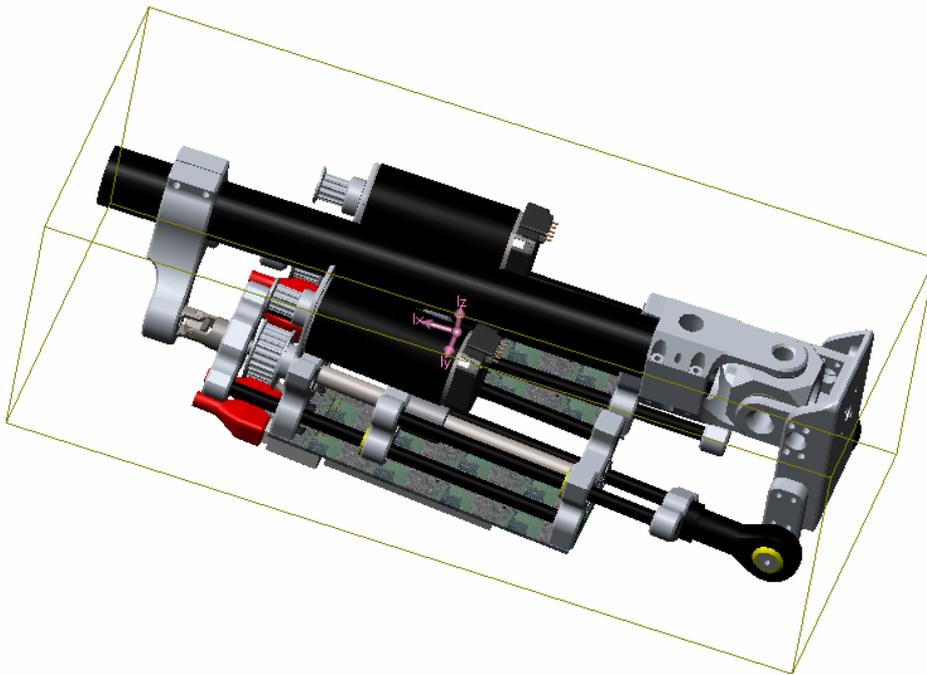
Genommen vom Ausgabekoordinatensystem

I_{xx} = 671596440.25 I_{xy} = 2513792.55 I_{xz} = -291346.35

I_{yx} = 2513792.55 I_{yy} = 5212749.88 I_{yz} = -4019269.49

I_{zx} = -291346.35 I_{zy} = -4019269.49 I_{zz} = 672745398.06

Körper



Masse = 1643.48 Gramm

Massenmittelpunkt: (Millimeter)

X = -20.79

Y = 885.59

Z = -87.87

Hauptachsen der Trägheit und Hauptträgheitsmomente: (Gramm x Millimeter²)

Am Massenmittelpunkt genommen

I_x = (-0.01, 1.00, 0.02) P_x = 2478404.24

I_y = (-0.09, -0.02, 1.00) P_y = 8550121.54

I_z = (1.00, 0.01, 0.09) P_z = 9356796.90

Trägheitsmomente: (Gramm x Millimeter²)

Bezogen auf den Massenmittelpunkt, ausgerichtet auf das Ausgabekoordinatensystem

L_{xx} = 9348919.97 L_{xy} = -93601.70 L_{xz} = -74099.14

L_{yx} = -93601.70 L_{yy} = 2481471.63 L_{yz} = 103340.17

L_{zx} = -74099.14 L_{zy} = 103340.17 L_{zz} = 8554931.08

Trägheitsmomente: (Gramm x Millimeter²)

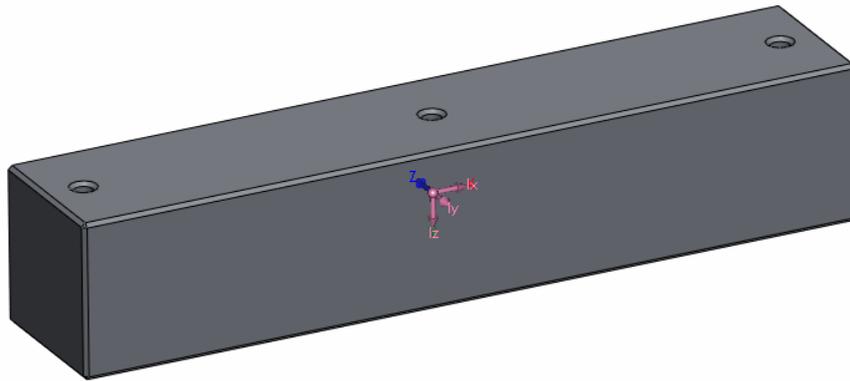
Genommen vom Ausgabekoordinatensystem

I_{xx} = 1310960191.22 I_{xy} = -30358801.00 I_{xz} = 2928740.06

I_{yx} = -30358801.00 I_{yy} = 15880446.12 I_{yz} = -127780448.86

I_{zx} = 2928740.06 I_{zy} = -127780448.86 I_{zz} = 1298188542.11

Becken



Masse = 887.70 Gramm

Massenmittelpunkt: (Millimeter)

$$X = 0.00$$

$$Y = 0.00$$

$$Z = 0.00$$

Hauptachsen der Trägheit und Hauptträgheitsmomente: (Gramm x Millimeter²)

Am Massenmittelpunkt genommen

$$I_x = (1.00, 0.00, 0.00) \quad P_x = 236896.90$$

$$I_y = (0.00, 0.00, -1.00) \quad P_y = 3060172.57$$

$$I_z = (0.00, 1.00, 0.00) \quad P_z = 3061099.19$$

Trägheitsmomente: (Gramm x Millimeter²)

Bezogen auf den Massenmittelpunkt, ausgerichtet auf das Ausgabekoordinatensystem

$$L_{xx} = 236896.90 \quad L_{xy} = 0.00 \quad L_{xz} = 0.00$$

$$L_{yx} = 0.00 \quad L_{yy} = 3061099.19 \quad L_{yz} = 0.00$$

$$L_{zx} = 0.00 \quad L_{zy} = 0.00 \quad L_{zz} = 3060172.57$$

Trägheitsmomente: (Gramm x Millimeter²)

Genommen vom Ausgabekoordinatensystem

$$I_{xx} = 236896.90 \quad I_{xy} = 0.00 \quad I_{xz} = 0.00$$

$$I_{yx} = 0.00 \quad I_{yy} = 3061099.19 \quad I_{yz} = 0.00$$

$$I_{zx} = 0.00 \quad I_{zy} = 0.00 \quad I_{zz} = 3060172.57$$

Abkürzungsverzeichnis

CoM	<i>Massenmittelpunkt (engl. Center of Mass)</i>
GCoM	<i>Projektion des Massenmittelpunktes (engl. Ground projection of Center of Mass)</i>
CoP	<i>Druckzenterpunkt (engl. Center of Pressure)</i>
ZMP	<i>Nulldrehmomentpunkt (engl. Zero Moment Point)</i>
CMP	<i>Gelenk des Massenmittelpunktdrehmomentes (engl. Centroidal Moment Pivot)</i>
FRI	<i>Fußdrehindikator (engl. Foot Rotation Indicator)</i>
LIPM	<i>lineares inverses Pendel Modell</i>
KNN	<i>Künstliche Neuronale Netze</i>
CAD/CAE	<i>engl. Computer-Aided Design / Computer-Aided Engineering</i>
DOF	<i>Freiheitsgrad (engl. Degree of Freedom)</i>
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i>
DMS	<i>Dehnmessstreifen</i>
FEM	<i>Finite-Elemente Methode</i>
MKS	<i>Mehrkörpersimulation bzw. Mehrkörpersimulator</i>
RCP	<i>engl. Rapid Control Prototyping</i>
TiL	<i>engl. Target-in-the-Loop Simulation</i>
SiL	<i>engl. Software-in-the-Loop Simulation</i>
HiL	<i>engl. Hardware-in-the-Loop Simulation</i>
DSP	<i>Digitaler Signalprozessor</i>
FPGA	<i>Programmierbarer Integrierter Schaltkreis (engl. Field Programmable Gate Array)</i>
ASIC	<i>Anwendungsspezifische Integrierte Schaltung (engl. Application Specific Integrated Circuit)</i>
HAL	<i>Hardwareabstraktionsebene (engl. Hardware Abstraction Layer)</i>
ADC	<i>Analog/Digital Wandler (engl. Analog-Digital Converter)</i>
PWM	<i>Puls-Breite-Modulation (engl. Puls- Width Modulation)</i>
MIPS	<i>Millionen Instruktionen pro Sekunde</i>

Literaturverzeichnis

- [1] Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., Takenaka, T.: The Development of Honda Humanoid Robot, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1998
- [2] M. Hirose, Y. Haikawa, T. Takenaka, and K. Hirai: Development of Humanoid Robot ASIMO, in IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) – Maui, Hawaii, 2001
- [3] Löffler K., Gienger M., Pfeiffer F.: Sensor and Control Design of a Dynamically Stable Biped Robot. Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, September, 2003
- [4] Vukobratovic M., Borovac B., Surla D., Stokic D., Scientific Fundamentals of Robotics. Vol.7, “Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Applications”, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [5] Vukobratovic M., Juricic D.: Contribution to the synthesis of biped gait. IEEE Trans. Biomedical Eng., 16(1), 1969.
- [6] Sias, F. R., Zheng, Y. F.: How Many Degrees-Of-Freedom Does A Biped Need?, IEEE Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 297-302, 1990.
- [7] S. Kajita, T. Yamaura, and A. Kobayashi: Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1992.
- [8] Katic, D., Vukobratovic, M.: Connectionist Control Techniques for Humanoid Robots. In Proc. of the 11th Int. Conference on Advanced Robotics ICAR, Coimbra, Portugal, June 30 - July 3, 2003
- [9] Wilcox, B., Litwin, T., Biesiadecki, J., Matthews, J., Heverly, M., Morrison, J., Townsend, J., Ahmed, N., Sirota, A., Cooper, B.: ATHLETE: A Cargo Handling and Manipulation Robot for the Moon. In Journal of Field Robotics Vol.24(5): s.421-434. April 2007
- [10] Waldron, K. J., Song, S.-M.: Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1989
- [11] <http://www.defensetech.org/archives/001436.html>
- [12] Frik, M., Guddat, M., Losch, D.C., Karatas, M.: Terrain Adaptive Control of the Walking Machine Tarry II. In Proc. of European Mechanics Colloquium, Euromech 375 - Biology and Technology of Walking, Munich, pp.108-115, 1998
- [13] Gaßmann, B., Scholl, K.-U., Berns, K.: Behavior Control of LAURON III for Walking in Unstructured Terrain. In Proc. of Int. Conference on Climbing and Walking Robots CLAWAR01, September 2001, Karlsruhe, Germany

- [14] Albiez, J., Ilg, W, Luksch, T., Berns, K., Dillmann, R.: Learning a Reactive Posture Control on the Four-Legged Walking Machine BISAM. In Proc of IROS 2001, 29. Okt. - 3. Nov. 2001, Hawaii, USA.
- [15] Raibert, M. H.: Legged Robots That Balance. MIT Press, Cambridge, 1986
- [16] Pratt, J., Chew C.-M., Torres, A., Dilworth, P., Pratt, G.: An Intuitive Approach for Bipedal Locomotion. Int. Journal of Robotics Research, 20:(2), 129-143, 2001
- [17] Buehler, M., Playter, R., Raibert, M.: Robots Step Outside. Int. Symp. Adaptive motion of Animals and Machines AMAM, Ilmenau, Germany, September 2005
- [18] Gorinevsky, D. M.; Shneider, A. Yu.: Force control in locomotion of legged vehicle over rigid and soft surfaces. Int. J. of Robotics Research, 9/2, 1990, 4-23.
- [19] Schneider, A.; Schmucker, U.: Force control of six-legged robot for service operations. Climbing and Walking Robots (CLAWAR), 2nd Inter. Workshop & Conference, Portsmouth, UK, 231-238.
- [20] Palis, F., Rusin, V., Schmucker, U., Schneider, A., Zavgorodniy Y.: "Legged Robot with Articulated Body in Locomotion over Complex Terrain". In Proc. of the 7th Int. Conf. on CLAWAR and the Support Technologies for Mobile Machines, Madrid (Spain), 22-24 September 2004.
- [21] Palis, F., Rusin, V., Schmucker, U., Schneider, A., Zavgorodniy Y.: "Walking robot with articulated body and force controlled legs". In Proc. of the 3th Int. Symp. on Adaptive Motion on Animals and Machines AMAM'05, Ilmenau, Germany, 25-30 September 2005.
- [22] www.uni-magdeburg.de/ieat/robotslab
- [23] Rusin, V., Schmucker, U., Schneider, A., Zavgorodniy Y.: "Force sensing for walking robots". In Proc. of the 3th Int. Symposium on Adaptive Motion on Animals and Machines AMAM'05, Ilmenau (Germany), 25-30 September 2005.
- [24] Schneider, A.; Schmucker, U.: Force legged Platform "Katharine" for Service Operations. 4th Inter. Conf. on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'01, 24-26 September, 2001, Karlsruhe.
- [25] Rusin, V.: Adaptive Regelung von Robotersystemen in Kontaktaufgaben. Dissertation, Universität Magdeburg, 2007
- [26] Konyev M., Melnikov A., Rudskyy A., Rusin V., Telesh A., Zavgorodniy Y. "Echtzeitfähiges verteiltes Steuerungssystem für Schreitroboter", Wissenschaftstage an der Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und Automatisierung, July, 2008, Magdeburg.
- [27] McGeer, T.: Passive dynamic walking. International Journal of Robotics Research, Vol.9 (2) s.62-68, April 1990.
- [28] McGeer, T.: Dynamics and control of bipedal locomotion. Journal of Theoretical Biology, Vol.166 (3) s.277-314, August 1993.
- [29] Garcia, M., Chatterjee, A., Ruina, A.: Efficiency, speed, and scaling of two-dimensional passive-dynamic walking. In Dynamics and Stability of Systems, Vol.15(2): s.75-99, June 2000
- [30] Goswami, A., Espiau, B., Keramane, A.: Limit cycles and their stability in a passive bipedal gait. In Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, USA, s.246-251, 1996

- [31] Van der Linde, R.Q.: Active leg compliance for passive walking. In Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, s.2339-2344, 1998
- [32] Collins, S.H., Wisse, M., Ruina, A.: A three-dimensional passive-dynamic walking robot with two legs and knees. *Int. J. of Robotics Research*, 20 (7): s. 605-615, July 2001
- [33] Adofsson, J., Dankowicz, H., Nordmark, A.: 3D passive walkers: finding periodic gaits in the presence of discontinuities. *Nonlinear Dynamics*, Vol.24(2): s.205-229, 2001
- [34] Collins, S.H., Ruina, A., Tedrake, R., Wisse, M.: Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers. In *Science*, Vol.307: s.1082-1085, 2005
- [35] Kato, I., Tsuiki, H.: The hydraulically powered biped walking machine with a high carrying capacity. In Proc. of the 4th Int. Symposium on External Control of Human Extremities, Dubrovnik, Yugoslavia, s. 410-421, September 1972
- [36] Takanishi, A., Ishida, M., Yamazaki, Y. and Kato, I.: The realization of dynamic walking by the biped walking robot WL-10RD. In Proc. of the Int. Conference on Advanced Robotics, s.459-466, September 1985
- [37] Miura, H., Shimoyama, I.: Dynamic walk of a biped. In *Int. Journal of Robotics Research*, Vol.3(2): s.60-74, 1984
- [38] Furusho, J., Masubuchi, M.: Control of a dynamical biped locomotion system for steady walking. In *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol.108: s.111-118, 1986
- [39] Westerwelt, E.R., Grizzle, J.W., Chevallereau, C., Choi, J.H., Morris, B.: *Feedback Control of Dynamic Bipedal Robot Locomotion*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2007
- [40] Kajita, S., Tani, K.: Experimental study of biped dynamic walking. In *IEEE Control Systems Magazine*, Vol.16(1): s.13-19, February 1996
- [41] A. Kun and W. T. Miller III.: Adaptive dynamic balance of a biped using neural networks. In Proc. of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1996
- [42] S. Hosogi, N. Watanabe, M. Sekiguchi.: A neural network model of the cerebellum performing dynamic control of a robotic manipulator by learning. *Fujitsu Science and Technology Journal*, 1993.
- [43] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Yokoi, K., Hirukawa, H.: A realtime pattern generator for biped walking. In Proc. of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Washington, USA, s.31-37, 2002
- [44] Kaneko, K., Kanehiro, F., Kajita, S., Yokoyama, K., Akachi, K., Kawasaki, T., Ota, S., Isozumi, T.: Design of prototype humanoid robotics platform for HRP. In Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, Switzerland, s.2431-2436, 2002
- [45] Pratt, J.E., and Pratt, G.A.: Intuitive control of a planar bipedal walking robot. In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, s.2014-2021, 1998

- [46] Pratt, J.E.: Exploiting Inherent Robustness and Natural Dynamics in the Control of Bipedal Walking Robots. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2000
- [47] Pratt, J.E., Chee, M.C., Torres, A., Dilworth, P., Pratt, G.A.: Virtual model control: an intuitive approach for bipedal locomotion. In Int. Journal of Robotics Research, Vol.20(2): s.129-143, 2001
- [48] Pratt, G.A., Williamson, M.M.: Series elastic actuators. In Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, Pittsburgh, USA, s.399-406, August 1995
- [49] MIT Leg Lab: <http://www.ai.mit.edu/projects/leglab> , Stand 2008
- [50] ROBEA Project: Robotics and Artificial Entities. Control of a biped on walking and running gaits. <http://robot-rabbit.lag.ensieg.inpg.fr>
- [51] Chevallereau, C., Abba, G., Aoustin, Y., Plestan, F., Westervelt, E.R., Canudas-de-Wit, C., Grizzle, J.W.: RABBIT: A Testbed for Advanced Control Theory. In IEEE Control Systems Magazine, Vol. 23(5): s.57-79, October, 2003.
- [52] Löffler, K.: Dynamik und Regelung einer zweibeinigen Laufmaschine, Fortschrittberichte VDI, Reihe 8. Nr. 1094.,Düsseldorf: VDI-Verlag, 2006
- [53] Gienger, M.: Entwurf und Realisierung einer zweibeinigen Laufmaschine, Fortschrittberichte VDI, Reihe 1. Nr. 378.,Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005
- [54] Lohmeier, S.; Löffler, K.; Gienger, M.; Ulbrich, H.; Pfeiffer, F.: Computer System and Control of Biped Johnnie, In Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2004.
- [55] Lohmeier, S.; Buschmann, T.; Ulbrich, H. & Pfeiffer, F.: Modular Joint Design for a Performance Enhanced Humanoid Robot, In Proc. of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.88-93, Orlando, USA, 2006
- [56] Ulbrich, H.; Buschmann, T., Lohmeier, S.: Development of the Humanoid Robot LOLA, Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 5-6, pp. 529-539, 2006
- [57] Höhn, O.: Robotic Projects at the Institute of Automatic Control IRT - University of Hannover. Proceedings of the French-German Workshop on Humanoid and Legged Robots (HLR), October 2004, Metz, France, S. 27-41.
- [58] Hofschulte, J.; Gerth, W. & Seebode, M.: Parallel Manipulator Hip Joint for a Bipedal Robot. In Proc. of the 7th Int. Conference on Climbing and Walking Robots - CLAWAR 2004, Berlin-Heidelberg, Springer, S. 601-609.
- [59] Park, I.W., Kim, J.Y., Park, S.W., Oh, J.H.: Development of Humanoid Robot Platform KHR-2 (KAIST Humanoid Robot-2). In Int. Journal of Humanoid Robotics, Vol. 2, No. 4, 2005, pp. 519 - 535.
- [60] Park, I.W., Kim, J.Y., Lee, J., Oh, J.H.: Mechanical design of humanoid robot platform KHR-3 (KAIST humanoid robot - 3: HUBO). In Proc. of 5th IEEE-RAS Int. Conference on Humanoid Robots, 2005
- [61] Asfour, T., Regenstein, K., Azad, P., Schröder, J., Dillmann, R.: ARMAR-III: A Humanoid Platform for Perception-Action Integration. In Proc. 2nd Int. Workshop on Human-Centred Robotic Systems, München, 6.-7. Oktober 2006

- [62] Edsinger, A., Weber, J.: Domo: A Force Sensing Humanoid Robot for Manipulation Research. In Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Humanoid Robotics, 2004
- [63] Hirzinger G., Albu-Schäffer A., Hähle M., Schaefer I., Sporer N. On a New Generation of Torque Controlled Light-Weight Robots. Proceedings of 2001 ICRA, Seoul, Korea, 2001, pp. 3356-3361.
- [64] Degallier, S., Righetti, L., Natale, L., Nori, N., Metta, G and Ijspeert, A.: A modular, bio-inspired architecture for movement generation for the infant-like robot iCub, IEEE RAS/EMBS Int. Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), October 2008, Scottsdale, Arizona, USA.
- [65] www.robocup.org
- [66] Morejnis I.S., Gritzenko G.P.: Biomechanische Ganganalyse im Norm und mit Prothese. Prothesen und Prothesenbau. Moskau. 1971, N26, s.7-16
- [67] Gurfinkel V.S., Fomin S.V., Shtilkind T.K.: Erfassung von Gelenkmomente bei der Lokomotion. Moskau, Biophysik, 1970, v.15, N.2, s.380-383.
- [68] Olree, K.S., Vaughan, C.L.: Fundamental Patterns of Bilateral Muscle Activity in Human Locomotion, in Biological Cybernetics 73, 409-414., 1995
- [69] David A. Winter.: Muscle mechanics. In Biomechanics and Motor Control of Human Movement, ch.7, pp.165–189. JohnWiley and Sons, Inc., 2nd ed., 1990.
- [70] Vitenson A.S.: Gesetzmäßigkeiten des normalen und pathologischen menschlichen Ganges. Zerkalo Verlag, Moskau, 2001.
- [71] Goswami, A.: Postural stability of biped robots and the foot-rotation indicator (FRI) point. Int. Journal of Robotics Research, 18(6):523–33, June 1999.
- [72] Beletski V.V. Biped Dynamics. Moskau, MTT, 1975
- [73] Beletski V.V., Berbyuk V.E. Nichtlineares Modells des Bipedes mit gesteuerten Füßen. Moskau, Institut angewandter Mathematik, 1978
- [74] Lavrovski E.K. Dynamik des zweibeinigen Gehens bei großen Geschwindigkeiten. Izv. AN USSR, MTT, 1980
- [75] Townsend M.A., Seireg A.: The synthesis of bipedal locomotion. Journal of Biomechanics. 1972, v. 5, No 1, p. 71-83.
- [76] Larin, B.V.: Control of walking robots. Kiev, Naukova Dumka, 1980.
- [77] Hiskens, I.A.: Stability of Hybrid System Limit Cycles: Application to the Compass Gait Biped Robot, Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida USA, December 2001.
- [78] Taga, G.: A Model of the Neuro-Musculo-Skeletal System for Human Locomotion. II. Realtime Adaptability Under Various Constraints. Biological Cybernetics 73, pp.113-121, 1995.
- [79] J.Hu, J.Pratt and G.Pratt: Stable Adaptive Control of a Bipedal Walking Robot with CMAC Neural Networks. Proceedings of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Detroit, USA, pp. 1950-1956, May 1999.
- [80] Doerschuk, P., Nguyen, V., Li, A.: Neural network control of a three-link leg. In Proc. of the Int. Conference on Tools with Artificial Intelligence, 1995.

- [81] Doerschuk, P., Nguyen, V., Simon, W., Kwong, W.: Intelligent ballistic control of a jointed leg. In Proc. of the IEEE Int. Joint Symp. on Intelligence and Systems, 1996
- [82] Reil, T., Husbands, P.: Evolution of Central Pattern Generators for Bipedal Walking in a Real-Time Physics Environment. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.6, No.2, pp.156-158, April 2002.
- [83] Katic, D., Vukobratovic, M.: Connectionist Control Techniques for Humanoid Robots Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics ICAR 2003, Coimbra, Portugal, June 30
- [84] Vukobratovic M.: How to control the artificial anthropomorphic systems. IEEE Trans. Syst., Man, Cybernetics, SMC-3, 497, 1973.
- [85] Arakawa T., Fukuda T.: Natural motion of biped locomotion robot using hierarchical trajectory generation method consisting of GA, EP, layers. Proc. IEEE Conf. Automation Robotics, Albuquerque, NM, 211, 1997.
- [86] Inoue K., Yoshida H., Arai T., Mae Y.: Mobile manipulation of humanoids — real time control based on manipulability and stability. Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automation, San Francisco, 2217, 2000.
- [87] Huang Q., Kajita S., Koyachi N., Kaneko K., Yokoi K., Arai H., Komoriya K., Tanie K.: A high stability, smooth walking pattern for a biped robot. Proc. IEEE Int. Conf. Automation Robotics, Detroit, 65, 1999.
- [88] Yagi, M., Lumelsky: Biped robot locomotion in scenes with unknown obstacles. Proc. IEEE Int. Conf. Automation Robotics, Detroit, 375, 1999.
- [89] Fujimoto, Y., Obata S., Kawamura A.: Robust biped walking with active interaction control between foot and ground. Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automation, Leuven, Belgium, 1988.
- [90] Surdilovic, D., Bernhardt R.: Robust control of dynamic interaction between robot and human: application in medical robotics. Proc. German Robotic Conf., 429, 2000.
- [91] Shiavi, R.: Elektromyographic patterns in adult locomotion: a comprehensive review. Journ. Of Reh. Res. And Dev. 22(3): p.85-98. 1985
- [92] Inmann V.T., Ralston J.R., and Todd F. Human Walking. Baltimore, Williams&Wilkinns. ISBN: 0-683-04348-X, 1981
- [93] Grishin, A.A., Formal'sky, A.M., Lensky, A.V., Zhitomirsky, S.V.: Dynamical walking of a vehicle with two telescopic legs controlled by two drives. In Int. Journal of Robotics Research, Vol.13(2): s.137-147, 1994
- [94] Formal'sky A.M.: Lokomotion der anthropomorphen Mechanismen. Moskau, „Nauka“, 1982.
- [95] Formal'sky A.M.: Ballistic Locomotion of a Biped. Design and Control of Two Biped Machines. In Human and Machine Locomotion, ed. A.Morecki and K.Waldron. Udine, Italy: CISM, Springer-Verlag, pp. 191-229, 1997.
- [96] Aoustin Y., Formal'sky A.M., Lavrovsky E.: Ballistic run of an anthropomorphic biped. In CLAWAR 2002, pp. 399-406, 2002.

- [97] T.Sugihara, Y.Nakamura, H.Inoue. Realtime Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation based on Inverted Pendulum Control. In Proc. of the IEEE Int. Conference on Robotics & Automation, Washington, May 2002
- [98] Cruse, H., Brunn, D.E., Bartling, Ch.: Walking: A complex behavior controlled by simple networks. Adaptive Behavior, 1995.
- [99] Kurematsu, Y., Katayama, O., Iwata, M., and Kitamura, S.: Autonomous Trajectory Generation of a Biped Locomotive Robot, Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks, pp. 1983-1988, 1991.
- [100] Juang, J.G., Lin, C.S.: Gait Synthesis of a Biped Robot Using Backpropagation Through Time Algorithm. Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks, Washington D.C., USA, pp. 1710-1715, 1996.
- [101] Juang, J.G.: Fuzzy Neural Network Approaches for Robotic Gait Synthesis. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. Cybernetics, Vol.30, pp.594-601, 2000.
- [102] Nagasaka, K., Konno, A., Inaba, M., and Inoue, H.: Acquisition of Visually Guided Swing Motion Based on Genetic Algorithms and Neural Networks in Two Armed Bipedal Robot. Proc. of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, USA, pp.2944-2949, April 1997.
- [103] Endo, K., Yamasaki, F., Maeno, T., and Kitano, H.: A Method for Co-Evolving Morphology and Walking Pattern of Biped Humanoid Robot. Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Washington, USA, pp.2159-2164, 2000.
- [104] Russell L. Smith: Intelligent motion control with an artificial cerebellum. Phd.Thesis, University of Auckland, Australia, 1998
- [105] Kajita, S., Tani, K.: Adaptive Gait Control of a Biped Robot based on Real-time Sensing of the Ground Profile, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 570-577, 1996
- [106] Takanishi, A., Takeya, T., Karaki, H. & Kato, I.: A Control Method For Dynamic Biped Walking Under Unknown External Force, IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems pp. 795-801, 1990.
- [107] Gorinevsky D.M., Formalsky A.M., Schneider A. Yu. Force Control of Robotics Systems. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2000.
- [108] Rusin. V., Schmucker U., Schneider A., Zavgorodniy Y. Legged Adaptive Platform for Service Operations. 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems IAS8, Amsterdam, 10-13 March, 2004.
- [109] Palis F., Rusin. V., Schmucker U., Schneider A., Zavgorodniy Y. Walking Robot with Force Controlled Legs and Articulated Body. 15th International Symposium on Measurement and Control in Robotics ISMCR2005, Royal Military Academy, Brussel, 8-10 November 2005.
- [110] Palis, F., Rusin, V., Schneider, A.: Adaptive impedance/force control of legged robot systems, 5th Int. Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'02, Sept. 2002, Paris, France.
- [111] Konyev M., Palis F, Rusin V., and Zavgorodniy Y., "Control System of Six Legged Autonomous Intelligent Robot", 7th Conference on Mobile Robots and Competitions, April 2007, Paderne, Portugal.

- [112] Dzhantimirov S., Palis F., Schmucker U., Telesh A., Zavgorodniy Y. "HIL/SIL by Development of Six-Legged Robot SLAIR2", 10th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots CLAWAR2007, 16-18 July, 2007, Singapore
- [113] Palis F, Rusin V., Konyev M., and Zavgorodniy Y., "SLAIR 2 - Six Legged Autonomous Intelligent Robot", Thematic Issue ONPU 2006, Odessa, Ukraine.
- [114] Konyev M., Palis F., Zavgorodniy Y., Melnikov A., Rudskyy A., Telesh A., Walking Robot "ANTON": Design, Simulation, Experiments, 11th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'08, Sept.2008, Coimbra, Portugal.
- [115] Projektantrag ProINNO II: Entwicklung eines Motorprototyps für einen langsamlaufenden Antrieb mit hohem Drehmoment „tDrive“, Magdeburg, 2007
- [116] Tsepkovskiy, Y., Filaretov, V., Zavgorodniy, Y.: Mechanisms for rotational and linear motion based on twisting of non-extensible wires. Journal of Machine Construction and Reliability, Moscow, 2008. In printing
- [117] www.faulhaber.de
- [118] www.robodrive.de
- [119] VDI 2206, Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth Verlag, 2004
- [120] Espiau, B., Sardain, P.: The anthropomorphic biped robot BIP 2000. In Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Aut. (ICRA), San Francisco, USA, pp. 3997–4002, 2000
- [121] Schmucker, U., Rusin, V., Konyev, M.: Contact processing in the Simulation of Multi-Body Systems. In Proc. of 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, Ljubljana, Slovenia, September 2007
- [122] Juhasz, T., Rusin, V., Konyev, M., Schmucker, U.: Contact processing in the Simulation of CLAWAR. In Proc. of 10th International Conference on Climbing and Walking Robots, Singapore, 16-18 July, 2007
- [123] Vortex, www.cm-labs.com
- [124] Chan, L.; Leung, T.: Spiral Design Model for Consumer Mechatronics Products. In. Mechatronics. Volume 6, No. 1, , pp. 35-51, 1996
- [125] Gausemeier, J.; Feldmann, K.: Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [126] Isermann, R.: Mechatronische Systeme: Grundlagen. Springer Verlag, Berlin, 1999
- [127] Lückel, J.; Koch, T.; Schmitz, J.: Mechatronik als integrative Basis für innovative Produkte. In: VDI-Tagung: Mechatronik – Mechanische/Elektrische Antriebstechnik. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000
- [128] www.ethercat.org
- [129] www.mathworks.com
- [130] www.hilscher.com
- [131] www.sercos.org
- [132] DFG SPP „Autonomes Laufen“. Abschlußbericht.: Multisensorielle Verfahren zur Bewegungssteuerung sechsbeiniger Schreitroboter. Fraunhofer IFF Magdeburg, Dezember 1999

- [133] Sciavicco L., Siciliano B. *Modelling and Control of Robot Manipulators*. Springer-Verlag, 2000, ISBN 1-85233-221-2.
- [134] Schilling, R.J.: *Fundamentals of Robotic Analysis and Control*. New Jersey, 1990
- [135] Bernstein N.A. :*Über den Bewegungsentwurf*. Moskau, Medgiz, 1947;
Notizen über die Physiologie der Bewegungen und Aktivitäten. Moskau, Medizin, 1966
- [136] Vukobratovic M., *Schreitroboter und anthropomorphe Mechanismen*. MIR Verlag, Moscow, 1976 (in russisch)
- [137] Elftman, H.: The measurement of the external force in walking. *Science* Vol.88: s. 152-153
- [138] Popovic, M., Hofmann, A., and Herr, H.: Angular momentum regulation during human walking: biomechanics and control. *Proc. of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, pp. 2405–2411, 2004
- [139] Herr, H., Hofmann, A., Popovic, M.: New horizons for orthotic and prosthetic technology: merging body and machine. *ZIF Int. Conference on Walking Machines*, Bielefeld, Germany.
- [140] Hofmann, A.: Control rules for biomimetic human bipedal locomotion based on biomechanical principles. *Dissertation, Computer Science and Electrical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology*, 2003
- [141] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K., and Hirukawa, H.: Resolved momentum control: humanoid motion planning based on the linear and angular momentum. *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, NV, pp. 1644–1650, 2003
- [142] Kajita, S., Nagasaki, T., Kaneko, K., Yokoi, K., and Tanie, K.: A hop towards running humanoid biped. *Proc. of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, pp. 629–635, 2004