



Konstruktion neuartiger Fußgeometrien für einen humanoiden Laufroboter

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

Master of Science (M.Sc.)

an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München

Betreut von	Prof. dr. ir. Daniel J. Rixen, M.Sc. Felix Sygulla, M.Sc. Lehrstuhl für Angewandte Mechanik						
Eingereicht von	Florian Künzel Äußere Maximilianstr. 12 82467 Garmisch						
Eingereicht am	Garching, den 5. Juli 2017						

Inhaltsverzeichnis

T	Einl	eitung	1
	1.1	Motivation	1
	1.2	Aufgabenstellung und Zielsetzung	2
	1.3	Forschungsmethodik	2
	1.4	Aufbau der Arbeit	3
0	Ctor	d der Wissenschaft und Tachnik	-
2	Star	la der Wissenschaft und Technik	5
	2.1		5
	2.2		0
			6
		2.2.2 Fulskonstruktion bei WL-12RVI	/
		2.2.3 Fulskonstruktion bei P2 und HRP-2	7
		2.2.4 Fulskonstruktion bei Choi	8
		2.2.5 Fulskonstruktion bei Yang	9
	2.3	Zehengelenkskonstruktionen	10
		2.3.1 Passive Zehengelenke	10
		2.3.2 Aktive Zehengelenke	11
	2.4	Bodentopologieerfassung	12
	2.5	Adaption an unebenes Terrain	13
		2.5.1 Anpassung durch sperrbare Freiheitsgrade	14
		2.5.2 Anpassung durch Feder	15
3	Anf	orderungen und Designkonzent	17
3	Anfo	orderungen und Designkonzept	17 18
3	Anf 3.1	o rderungen und Designkonzept Anforderungen	17 18 19
3	Anfe 3.1 3.2	o rderungen und Designkonzept Anforderungen	17 18 19 22
3	Anfo 3.1 3.2 3.3	orderungen und Designkonzept Anforderungen Zehenantrieb Sohle Bodentopologieerfassung	17 18 19 22
3	Anfe 3.1 3.2 3.3 3.4 2.5	orderungen und Designkonzept Anforderungen	17 18 19 22 26 27
3	Anfe 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5	orderungen und Designkonzept Anforderungen Zehenantrieb Sohle Bodentopologieerfassung Gesamtkonzept	17 18 19 22 26 27
3	Anfe 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 Kon	orderungen und Designkonzept Anforderungen	 17 18 19 22 26 27 29
3	Anfe 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 Kon 4.1	orderungen und Designkonzept Anforderungen Zehenantrieb Sohle Sohle Bodentopologieerfassung Gesamtkonzept struktion und Komponentenauswahl Vorgehen Konstruktion	 17 18 19 22 26 27 29 30
3	Anfe 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 Kon 4.1 4.2	orderungen und Designkonzept Anforderungen Zehenantrieb Zehenantrieb Sohle Bodentopologieerfassung Gesamtkonzept struktion und Komponentenauswahl Vorgehen Konstruktion Zehenaktor	 17 18 19 22 26 27 29 30 31
3	Anfe 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 Kon 4.1 4.2	orderungen und Designkonzept Anforderungen	 17 18 19 22 26 27 29 30 31 31
3	Anfa 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 Kon 4.1 4.2	orderungen und Designkonzept Anforderungen	 17 18 19 22 26 27 29 30 31 31 32
3	Anfa 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 Kon 4.1 4.2	orderungen und Designkonzept Anforderungen Zehenantrieb Zehenantrieb Sohle Sohle Bodentopologieerfassung Gesamtkonzept struktion und Komponentenauswahl Vorgehen Konstruktion Zehenaktor 4.2.1 Motorvorauswahl 4.2.2 Dimensionierung des Motors 4.2.3 Konstruktion des Zehenaktors	 17 18 19 22 26 27 29 30 31 31 32 38
3	Anfa 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 Kon 4.1 4.2	orderungen und Designkonzept Anforderungen Zehenantrieb Sohle Bodentopologieerfassung Bodentopologieerfassung Gesamtkonzept struktion und Komponentenauswahl Vorgehen Konstruktion Zehenaktor 4.2.1 Motorvorauswahl 4.2.3 Konstruktion des Zehenaktors Sohle	 17 18 19 22 26 27 29 30 31 31 32 38 39
4	Anfa 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 Kon 4.1 4.2	orderungen und Designkonzept Anforderungen Zehenantrieb Sohle Sohle Bodentopologieerfassung Gesamtkonzept struktion und Komponentenauswahl Vorgehen Konstruktion Zehenaktor 4.2.1 Motorvorauswahl 4.2.2 Dimensionierung des Motors 4.2.3 Konstruktion des Zehenaktors 4.3.1 Zweigeteile Sohle	 17 18 19 22 26 27 29 30 31 31 32 38 39 39 39
3	Anfa 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 Kon 4.1 4.2 4.3	orderungen und Designkonzept Anforderungen Zehenantrieb Sohle Sohle Bodentopologieerfassung Gesamtkonzept struktion und Komponentenauswahl Vorgehen Konstruktion Zehenaktor 4.2.1 Motorvorauswahl 4.2.2 Dimensionierung des Motors 4.2.3 Konstruktion des Zehenaktors Sohle 4.3.1 Zweigeteile Sohle 4.3.2 Monolithische Sohle	 17 18 19 22 26 27 29 30 31 31 32 38 39 39 40
3	Anfa 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 Kon 4.1 4.2 4.3	orderungen und Designkonzept Anforderungen Zehenantrieb Sohle Bodentopologieerfassung Bodentopologieerfassung Gesamtkonzept struktion und Komponentenauswahl Vorgehen Konstruktion Zehenaktor 4.2.1 Motorvorauswahl 4.2.2 Dimensionierung des Motors 4.2.3 Konstruktion des Zehenaktors Sohle 4.3.1 Zweigeteile Sohle 4.3.2 Monolithische Sohle Bodentopologieerfassung	 17 18 19 22 26 27 29 30 31 31 32 38 39 39 40 42
3	Anfa 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 Kon 4.1 4.2 4.3 4.4	orderungen und Designkonzept Anforderungen Zehenantrieb Sohle Sohle Bodentopologieerfassung Gesamtkonzept struktion und Komponentenauswahl Vorgehen Konstruktion Zehenaktor 4.2.1 Motorvorauswahl 4.2.2 Dimensionierung des Motors 4.2.3 Konstruktion des Zehenaktors 4.3.1 Zweigeteile Sohle 4.3.2 Monolithische Sohle Bodentopologieerfassung	 17 18 19 22 26 27 29 30 31 31 32 38 39 39 40 42 47
3	Anfa 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 Kon 4.1 4.2 4.3 4.3 4.4 Disł	Anforderungen und Designkonzept Anforderungen . Zehenantrieb . Sohle . Bodentopologieerfassung . Bodentopologieerfassung . Gesamtkonzept . struktion und Komponentenauswahl Vorgehen Konstruktion . Zehenaktor . 4.2.1 Motorvorauswahl . 4.2.2 Dimensionierung des Motors . 4.2.3 Konstruktion des Zehenaktors . Sohle . 4.3.1 Zweigeteile Sohle . 4.3.2 Monolithische Sohle . Bodentopologieerfassung .	 17 18 19 22 26 27 29 30 31 31 32 38 39 40 42 47

A	Anh	nang												
	A.1	Ausleg	gung Konzepte	51										
		A.1.1	Riemenantrieb	51										
		A.1.2	Bowdenzug	51										
	A.2	Ausleg	ung Diverses	52										
		A.2.1	Bestimmung des Auflagepunkts	52										
		A.2.2	Schraubenauslegung, Drehfederhalter	53										
		A.2.3	Dauerfestigkeitsberechnung	54										
	A.3	Ausleg	gung Motor	54										
		A.3.1	Motorkennlinien gesamt	54										
		A.3.2	Motorenvergleich von Lohmeier	55										
		A.3.3	Motortabelle von Parker Bayside	56										
		A.3.4	Federdatenblatt	57										

Literatur

Abbildungsverzeichnis

1.1	Forschungsmethodik
2.1	Fußkonstruktion von Lohmeier
2.2	Fußkonstruktion von Yamaguchi
2.3	Fußkonstruktion von Li 8
2.4	Fußkonstruktion von Choi 9
2.5	Fußkonstruktion von Yang
2.6	Der Windlassmechanismus
2.7	Der vierstängige Mechanismus nach Yamamoto
2.8	Schema Zustandsbeobachter
2.9	Unterstützungspolygon
2.10	Fußkonstruktion von Hashimoto
2.11	Federmechanismus
3.1	Münchner Vorgehensmodell
3.2	Zehenantriebslösungen 20
3.3	Kinematische Analyse
3.4	Seitliche Stefigkeit
3.5	Federverhalten
3.6	Lösungen der Fußdämpfung 24
3.7	Abbremsvorgang
3.8	Bodentopologieerfassung 26
3.9	Messkegel
3.10	Gesamtkonzept 28
4.1	MatlabModel1
4.2	MatlabModel1
4.3	Momentverlauf1
4.4	Momentverlauf1
4.5	Simulation
4.6	Motorkennlinien1
4.7	Motoraufbau
4.8	Aufbau des Federmechanismus
4.9	Aufbau der zweigeteilten Sohle 40
4.10	Bionische Optimierung
4.11	Aufbau der monolithischen Sohle
4.12	Auflagepunkt
4.13	Konfiguration der Hindernisse
4.14	Bodentopologie
4.15	Messwerte Infrarotsensor
4.16	Sensorhalter

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

1973 entwickelte die Waseda Universität in Tokyo den ersten anthropomorphen Roboter *Wabot-1*, der laufen und Gegenstände mit seinen Händen transportieren kann [46]. Seitdem erlangen humanoide Roboter stetig mehr Fähigkeiten. Sie steigen Treppen, öffnen Türen und fahren Auto. Einige Szenarien, in denen solche Laufroboter agieren, sieht man beispielsweise in der DARPA Robotics Challenge, bei der Ventile zugedreht, Löcher gebohrt oder Stromleitungen getrennt werden [36]. Um diese komplexen Aufgaben zu erledigen und flexibel zu agieren, benötigen Roboter eine große Anzahl an Freiheitsgraden. Angesteuert werden die Motoren der Gelenke über Regelungsprogramme. Neben der Software, die für die Steuerung zuständig ist, benötigt der Roboter auch eine robuste Struktur. Die Konstruktion muss Stößen und anderen Umweltbedingungen standhalten, Schwingungen dämpfen, niedriges Gewicht und geringe Trägheitsmomente aufweisen und Sensoren zur Verfügung stellen, mit der die Software die Motorbewegungen regelt. Dadurch stellt die Hardware Grenzen der Mobilität auf.

Mobilität ist von großer Bedeutung, da es den Einsatz humanoider Roboter vielseitiger macht. So können Aufgaben in für Menschen gefährlichen oder giftigen Umgebungen, wie Katastrophengebieten, übernommen werden. In Szenarien, in denen die Roboter eingesetzt werden, herrschen meist keine Laborbedingungen mit ebenem, hindernisfreiem Boden [47]. Einer der Hauptvorteile bei Robotern mit Beinen ist, sich über unebenes Terrain zu bewegen, wobei zweibeinige Roboter gegenüber mehrbeinigen Robotern die dynamische Stabilität bewahren müssen [21]. Humanoide Roboter neigen dazu, bei Stößen, unwegsamem Gelände oder Hindernissen umzukippen [29]. Damit Roboter auch auf unebenem Terrain laufen und agieren, müssen sie sich den Bodenbegebenheiten anpassen. Die Füße sind ein integraler Bestandteil, da sie den Kontakt zum Boden herstellen. Wenn sich die Füße dem Boden anpassen und eine große Fläche bieten, auf der der Körper des Roboters steht, ist die Regelung leichter umzusetzen. Menschen erhalten über die Sinnesorgane im Fuß Informationen über die Bodenbegebenheit und reagieren mit veränderter Fußstellung. Nach dem Vorbild der Menschen können auch Roboter die Information für bessere Stabilität nutzen. Allerdings ist die Aufnahme des Bodenkontakts mit Sensoren durch Schwingungen und Stöße noch immer eine Herausforderung und fordert innovative Ansätze.

Ein weiterer Aspekt der Mobilität ist das Überwinden großer Höhenunterschiede, wie bei Treppenstufen. Dafür sind Füße von Vorteil, die Hubhöhe erzeugen. Dies wird, ähnlich wie beim Menschen, durch ein weiteres Gelenk im Fuß erreicht. Durch ein aktives Zehengelenk werden größere Steigungen überwunden und die Beugung des Knies wird reduziert [32]. Zehengehen ist beim Treppabsteigen vorteilhaft, da die zur Verfügung stehende Beinlänge sozusagen verlängert wird [41]. Ein aktives Zehengelenk ist erstrebenswert, jedoch aufgrund der erhöhten Komplexität und der zusätzlichen Masse nur bei wenigen humanoiden Robotern im Einsatz.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, neuartige Fußgeometrien für den Laufroboter Lola zu entwickeln, um seine Mobilität zu erhöhen. Als Ausgangsobjekt dienen die bereits vorhandenen Füße des Laufroboters. Die Fußkonstruktion von Lola wurde für das Laufen unter Laborbedingungen entworfen und ist für unebenes Gelände nicht optimiert. Daher werden folgende Maßnahmen getroffen. Die Leistung des Zehengelenkaktors wird erhöht, um größere Höhenunterschiede zu überwinden. Dabei werden verschiedene Konzepte zur Aktuierung des Gelenks verglichen.

Der Fuß wird mit einer flächigen Fußsohle ausgestattet, auf der eine Sensormatte mit Drucksensoren in Matrixanordnung aufgebracht werden können, um den Bodenkontakt zu erfassen. Kleine Hindernisse, wie Steinchen, die bisher zwischen die Fußpads gerieten und Instabilität verursachten, sollen von der Sohle erfasst werden. Das modulare Design wird weitergeführt, um einfaches Austauschen zu ermöglichen. Ein geeigneter Mechanismus zur Dämpfung der Aufprallkraft bei Bodenkontakt ist zu berücksichtigen.

Es werden Sensoren integriert, die die Bodentopologie noch vor dem Kontakt der Sohle mit dem Boden erfassen. Damit ist es möglich, auf abweichenden Bodenabstand und kleine Hindernisse unter dem Fuß zu reagieren. Zur Erfassung werden verschiedene Konzepte erarbeitet und verglichen.

Um die Ziele zu erreichen und Inspiration für eine holistische Lösung zu erlangen, wird eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt. Die Konzeptentwicklung und Konstruktion werden durch eine Mehrkörpersimulation (MKS) unterstützt und iterativ verbessert. Abschließend werden die Dokumente für die fertigungsbereite Konstruktion erstellt.

1.3 Forschungsmethodik

Die verwendete Forschungsmethodik baut auf dem Konzept von [6] *DRM, a Design Research Methodology* auf. Dabei werden folgende Schritte durchlaufen:

- 1. Klärung der Forschungsziele
- 2. Deskriptive Studie 1
- 3. Präskriptive Studie
- 4. Deskriptive Studie 2

Die Stufen werden, wie in Abbildung 1.1 zu sehen ist, von oben nach unten durchlaufen, wobei ein Zurückspringen, also Iterationen zulässig sind. Eine Anpassung der Teilschritte ist auch möglich. Bei der "Klärung der Forschungsziele" wird der Stand der Forschung anhand einer Literaturrecherche betrachtet und Lücken ausfindig gemacht, um neben den vorgegebenen Verbesserungsbereichen weitere Potentiale aufzudecken. In der zweiten Stufe "Deskriptive Studie 1" werden die Ergebnisse zum besseren Überblick und Verständnis des Forschungsfeldes und des Unterstützungsbedarfs in Zusammenhang gebracht. Dabei werden die Potentiale der ersten Stufe berücksichtigt. In Stufe drei "Präskriptive Studie" werden anhand der verfeinerten Ziele Lösungskonzepte erarbeitet. Dabei wird auf den Ergebnissen der zwei vorigen Schritte aufgebaut. Die Ziele dieser Studie sind:

- 1. Soll-Zustand ausarbeiten
- 2. Lösung finden
- 3. Bewertung vorbereiten



Bild 1.1: Forschungsmethodik nach [6]

Das Ziel des vierten Schritts "Deskriptive Studie 2" ist die Bewertung der gefundenen Lösung. Dabei wird über eine Evaluierung der Ansatz getestet und gegebenenfalls weiterer Verbesserungsbedarf abgeleitet. Dabei ist in dieser Arbeit die Iteration zwischen "Deskriptiver Studie 2" und "Präskriptiver Studie" wichtig, da Konstruktionszyklen mehrmals durchlaufen werden. So werden die Ergebnisse aus den Verbesserungspotentialen in der Konstruktion angewendet und evaluiert. Dadurch wird die Konstruktion iterativ verbessert.

1.4 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau folgt der Forschungsmethodik. In Kapitel 2 wird der Stand der Forschung dargestellt. Die einzelnen Designs von Füßen und den Fußkontakten bei Humanoiden werden erläutert. Dann werden die Zehengelenk-Konstruktionen detailliert angeschaut. Es folgt die Recherche, wie die Bodentopologie erfasst wird und wie sich der Fuß an den Untergrund anpasst. Ergebnisse des Kapitels sind Potenziale zur Verbesserung und die Zielsetzung.

In Kapitel 3 werden die Anforderungen festgehalten. Um die Komplexität zu verringern, wird die Entwicklung in drei Designbereiche unterteilt. Zunächst wird ein Konzept zur Zehenaktuierung erarbeitet (Abschnitt 3.2). Es folgen Teilkonzepte zur Sohle (Abschnitt 3.3) und zur Bodentopologieerfassung (Abschnitt 3.4). Zum Abschluss des Kapitels wird das zusammengefügte Gesamtkonzept vorgestellt.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Konstruktion und beginnt mit dem Vorgehen und den Richtlinien. Dann werden wieder die drei Bereiche Zehe, Sohle und Bodentopologieerfassung nacheinander behandelt. Dabei wird jeweils auf die Besonderheiten in der Entwicklung, wie Experimente und Iterationen eingegangen. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5 diskutiert und anschließend wird in Kapitel 6 eine Zusammenfassung und ein Ausblick gegeben.

Kapitel 2

Stand der Wissenschaft und Technik

Der Stand der Wissenschaft gibt einen Überblick über die Entwicklungen im Bereich der Fußkonstruktionen humanoider Roboter. Die Recherche dient als Grundlage, Potentiale zur Verbesserung aufzudecken und zur Inspiration bei der Konzeptentwicklung. Da einige Fußdesigns spezielle Einsatzzwecke verfolgen, werden die verschiedenen Ansätze jeweils in Bezug zu den erstrebten Zielen von Lola betrachtet. Zunächst werden allgemeine Fußkonzepte vorgestellt, dann wird spezieller auf die Zehengelenke, die Adaption an unebenes Gelände und die Bodentopolgieerfassung eingegangen. Da sich einige Fußkonzepte auf den menschlichen Fußaufbau beziehen, wird zunächst als Grundlage die Biomechanik des Fußes betrachtet.

2.1 Biomechanik des menschlichen Fußes

Der anatomische Aufbau des Fußes besteht aus einem komplexen Zusammenspiel von Gelenken, Knochen, Bandverbindungen, Sehnen und Muskeln. Das Gewölbe des Fußes ist durch Knochen und Gelenksstruktur vorgegeben und wird statisch durch straffe Bänder sowie dynamisch durch kräftige Sehnen in seiner Form gehalten [28]. [8] reduziert diese komplexe Struktur und legt drei funktionale Einheiten fest: Rückfuß, Vorderfuß und Hallux (große Zehe).

Um den menschlichen Fuß vor dem Aufprall zu schützen werden aktive und passive Mechanismen genutzt [45]. Aktive Mechanismen entsprechen Muskelkontraktionen und Gelenkbewegungen. Dabei dienen Knie- und Fußneigung nicht der direkten Stoßdämpfung, sondern verlängern die Dauer in der Kräfte auf das Standbein einwirken [45]. Auch die Bewegung des Suptalargelenks verlängert die Dauer in der gebremst und die Aufprallenergie Energie verbraucht wird, indem sich Fußgelenk und Bein absenken [5]. Passive Stoßdämpfer des Fußes sind Körpergewebe mit viskoelastischen Eigenschaften, die sich bei Aufprall deformieren. Sie dienen auch als Tiefpassfilter, die hochfrequente Komponenten absorbieren [35]. Die passiven Stoßdämpfer finden sich in Gelenken und der Ferse. Beim menschlichen Gang trifft die Ferse zuerst auf und komprimiert sich und verteilt die Belastungen über die Fußsohle [37]. Durch die progressiven Dämpfungseigenschaften kann sich der Fuß bei Kontakt zuerst an den Boden anpassen und bei voller Last die stabilisierenden und antreibenden Kräfte effektiv an den Boden übertragen [37].

Subtalar- und Midtarsalgelenk im Fußgewölbe spielen eine weitere wichtige Rolle bei der Anpassung und Abfederung des Fußes. Diese Biomechanik wird in Abschnitt 4.3 bei der bionischen Konstruktion von [17] genauer behandelt.

2.2 Fußkonstruktionen von Humanoiden

2.2.1 Fußkonstruktion bei LOLA

Der Ausgangspunkt dieser Arbeit ist der Fuß von [31]. Der Fuß besitzt, wie bei [8], die drei Segmente: Vorderfuß (1), Rückfuß (2) und Hallux (3), siehe Abbildung 2.1. Die Ferse ist mit einem passiven Gelenk (4) mit dem Vorderfuß verbunden, was dem Subtalargelenk beim Menschen entspricht. Die Zehe ist mit einem aktiven Gelenk (5) mit dem Vorderfuß verbunden, wobei durch die modulare Konstruktionsweise auch ein passives Gelenk oder eine feste Verbindung möglich ist, welche den Vorteil geringerer Masse haben. Der Vorderfuß ist über einen Kraft-Drehmoment-Sensor (6) mit dem Fußgelenk (7) verbunden. Der Sensor liefert die Werte für die Regelungssoftware. Jedes der vier Sohlenpads besitzt einen Drucksensor (8), um den Kontaktzustand des Fußes zu registrieren. Die Sohlenpads sind aus einer steifen Basisplatte (9), einer viskoelastischen Schicht (10) und der Laufsohle (11) aufgebaut. Die Laufsohle ist aus abriebfestem Gummi mit hohem Reibungskoeffizienten, um Rutschen zu vermeiden. Die viskoelastische Schicht imitiert das menschliche Fersenpolster [35]. Die Schicht besitzt gute Dämpfungseigenschaften, keine signifikante Kompression, Langlebigkeit und eine gewisse Elastizität, um sich von Deformationen zu erholen. Durch die Deformation des viskoelastischen Anteils der Kontaktelemente passen sich die Füße kleinen Unebenheiten an.

Neben der viskoelastischen Schicht sorgt die drehbare Ferse mit hydraulischem Industriestoßdämpfer (12) für die Dissipation der Aufprall-Energie. Dabei sorgt der mechanische Endstopp (13) für gute Übertragung von Kräften zur Stabilisierung. Die Dämpfungsbandbreite der passiven Mechanismen ist begrenzt, da durch die Nachgiebigkeiten die Stabilisierung eingeschränkt wird. Daher sind aktive Dämpfungsmechanismen für zusätzliche Dämpfung empfehlenswert. Die Fußkonstruktion wurde für das Laufen unter Laborbedingungen entworfen und ist daher für unebenes Gelände nicht optimiert. Trifft Lola auf kleine Hindernisse, wie Kieselsteine, zwischen den vier Kontaktpads, wird dieser Kontakt nicht registriert und kann zu Instabilität führen.



Bild 2.1: Aufbau des Fußes nach [31]

2.2.2 Fußkonstruktion bei WL-12RVI

[47] entwickelte ein Fußkonzept mit Dämpfung, das drei Funktionen erfüllt: Informationen über den Kontaktzustand in Echtzeit zu sammeln, den Aufprallstoß dämpfen und die Stabilität des Standfußes erhöhen.



Bild 2.2: Aufbau des Fußes nach [47]

Informationen über den Boden werden aufgenommen, um die Trajektorie in Echtzeit anzupassen und so die Aufprallkräfte zu reduzieren und die Stabilität zu erhöhen. Daher wurde ein Fuß entwickelt, der die relative Position des Schwungbeines zum Boden misst und mit den Informationen über die Ansteuerung der Motoren den Impuls der Landung aktiv dämpft. Eine passive Dämpfung ist zusätzlich nötig, da die Messung sonst durch die vom Aufprall verursachten starken Schwingungen gestört wird. Der Fuß ist aus einer Platte (1) aufgebaut, die direkt unter dem Gelenk angebracht ist, einer unteren Platte (2) mit Kontaktelementen (3), einigen Kabeln (4), welche die untere und obere Platte verbinden und einer Sandwich-Struktur, die impulsabsorbierendes Material (5) einschließt, siehe Abbildung 2.2. Das impulsabsorbierende Material ist zum Schutz zwischen zwei stoßfesten Acrylplatten (6) gelagert. Die zwei vorderen Kontaktelemente (3) haben die Form einer Skischaufel, um Stolpern zu vermeiden, welches durch Rotation über die Fußspitze stattfindet. Durch die an den vier Ecken gelagerten linearen Potentiometer (7) wird die relative Position zwischen oberer Platte und unterer Platte, also dem Bodenkontakt, berechnet. Drei Punkte würden ausreichen, um die Lage einer Ebene zu bestimmen. Somit wird die Stellung der Fußplatte gegenüber dem Boden durch zwei Dreipunkt-Messungen gemittelt.

Der Stabilisationsmechanismus des Support-Beines funktioniert über passive Freiheitsgrade im Fuß. Diese werden basierend auf dem Zustand, wie der Fuß aufkommt, generiert. Die an der oberen und unteren Platte versetzt angebrachten Stopper (8) erlauben je einen Freiheitsgrad in X- und Y-Richtung. Weiterhin ist durch den Spielraum zwischen oberem Stopper und unterem Fußplatte ein Freiheitsgrad in Z-Richtung gegeben. Nach oben wird dieser Spielraum durch die Kabel begrenzt. Wird das Dämpfungsmaterial dann mit dem vollen Gewicht belastet, sorgt eine Silikonschicht (9) durch seinen hohen Reibungskoeffizienten für die Einschränkung der Freiheitsgrade in X- und Y-Richtung. Die Z-Richtung wird durch einen Endstopp aus Teflon (10) begrenzt.

2.2.3 Fußkonstruktion bei P2 und HRP-2

Häufig werden Kompressions- und Scherhalterungen für die Aufpralldämpfung verwendet [20, 23]. Die Steifheit unter Scherbelastung ist deutlich geringer als bei Druckbelastung, was die Bandbreite transferierbarer Kräfte reduziert und somit auch die Steuerungsleistung [31]. [20] hat in den Füßen des Roboters P2 einen Mechanismus zur Dämpfung des Aufpralls integriert, der die Scherbelastung durch ein Schienensystem deutlich reduziert. Dazu wurden Gummi-Buchsen in

eine Führung eingesetzt. Diese verformen sich in vertikaler Richtung unter Krafteinwirkung elastisch. Der Mechanismus reduziert die Übermittlung des Aufpralls und fungiert als Niederpass-Filter, der die Vibrationen vermindert. [29] hat dieses Prinzip für den Roboter HRP-2 weiterentwickelt. Der Fuß dämpft den Kontaktimpuls und misst die Fußstellung. Der Fuß besteht aus einer unteren Platte (1), einer oberen Platte (2) mit Kraft-Drehmoment-Sensor (3), einer Abdeckplatte (4), vier Gummibuchsen aus impulsabsorbierendem Material (5) und vier Gummipads als Kontaktelemente (6), siehe Abbildung 2.3.



Bild 2.3: Aufbau des Fußes nach [29]

Der Absorptionsmechanismus ist einfach gehalten. Die obere Platte ist mit dem Kraft-Drehmoment-Sensor verbunden. Auf der Oberseite der unteren Platte ist eine versenkte Struktur, die einen Schienenmechanismus für die obere Platte besitzt. Diese kann sich somit in vertikaler Richtung bewegen. Dazwischen sind vier Gummibuchsen platziert, die den Hauptteil des Aufpralls absorbieren. Das Material, die Dicke und die Größe der Gummi-Buchsen werden experimentell bestimmt. Ist der Fuß zu steif, werden selbst durch kleinste Unebenheiten im Untergrund starke Vibrationen verursacht oder der Roboter fällt um. Ist das Dämpfungsmaterial zu weich, ist es schwer den Roboter stabil zu steuern. Durch diesen Aufbau wird nur ein Freiheitsgrad in vertikaler Richtung generiert und gedämpft. Steuernde Drehmomente werden somit immer direkt an den Boden übertragen. Vier Gummiunterlagen mit hohem Reibungskoeffizienten sind an der untere Platten angebracht, die das Rutschen des Roboters verhindern und eine zusätzliche Stoßdämpfung zwischen Fuß und Boden darstellen. Eine an der unteren Platte befestigte Hardwareeinheit mit Beschleunigungssensor und Gyroskop misst Drehbewegungen und Neigung. Eine Plastik-Umhüllung dient dem Schutz des Fußes vor Umwelteinflüssen. Durch die vorne und hinten abgerundete Fußplatte wird eine Heel-contact and toe-off Bewegung erreicht. Diese Bewegung wird charakterisiert durch ein Auftreffen mit der abgerundeten Ferse, dem Abrollen, bis die Sohle flach auf dem Boden liegt, und Abrollen auf die abgerundete Zehe, kurz bevor der Fuß in die Schwungphase übergeht. [29] nennt drei Nachteile, wenn der Fuß parallel zum Boden landet und abhebt. Es kommt leicht zu Vibrationen, wenn der Fuß nicht ganz parallel zum Boden landet, was sich kaum verhindern lässt. Die Gehgeschwindigkeit wird durch geringere Schrittweite reduziert. Die Effizienz der Bewegung ist somit geringer. Wenn die Ferse angehoben wird, wird zudem die Dauer der bipedalen Standphase erhöht.

2.2.4 Fußkonstruktion bei Choi

[10] entwickelt ein Fußdesign, das den Aufprallstoß effektiv durch eine Luftdämpfung abfängt. Wie in Abbildung 2.4 dargestellt, ist der Fuß aus einer Fußplatte (1), zwei Zehen-Luftkammern (2) und einer Fersen-Luftkammer (hier nicht dargestellt) aufgebaut. Zwischen die Luftkammern und die obere Platte wird eine Dichtungsplatte (3) integriert, um das Austreten der Luft zu vermeiden. In den Luftkammern sind Federn (4), die die Kammer wieder mit Luft füllen, wenn der Fuß in der Schwingphase ist. Um die Adaptabilität an unebene Oberflächen zu verbessern, wird die zehenseitige Luftkammer in zwei Luftkammern aufgeteilt. Die dritte Luftkammer in der Ferse hat



Bild 2.4: Aufbau des Fußes nach [10]

beim Gehen Erstkontakt und dämpft den initialen Aufprall ab. Daher wird hier ein höherer Dämpfungskoeffizient benötigt. Dieser wird durch eine größere Auftrefffläche erreicht, die proportional zum Dämpfungskoeffizienten ist. Die Luftkammern werden solange komprimiert, bis die Gummiplatte (5) den Boden erreicht. Über die Gummiplatte werden die Steuerungsdrehmomente effektiv an den Boden übertragen. Experimente zeigen, dass der Aufprall, das Gelenk-Drehmoment und die Schwingungen zwischen Fuß und Boden gegenüber Gummidämpfung signifikant reduziert werden.

2.2.5 Fußkonstruktion bei Yang

[49] entwickelte einen Roboter mit 12 DOFs je Fuß, der sich an komplexe Untergründe anpasst. Der Fuß ist aus vier Platten (1) aufgebaut, siehe Abbildung 2.5. Jede Platte kann um die X- und Y-Achse rotieren und besitzt einen festen Gummidorn (2) und einen, der sich nach vorne und hinten bewegen lässt (3). Die Bewegungen des Gummidorns und der Platten stellen sicher, dass es immer mindestens vier Auflagepunkte gibt und das Unterstützungs-Polygon so groß wie möglich ist. Das Unterstützungspolygon ist die größtmögliche Fläche, die die Bodenkontakte aufspannen. Verschoben werden die Gummidorne mithilfe einer Feder (4) und einem Elektromotor (5) mit Kabelzug. Über einen weiteren Kabelantrieb wird die Kippbewegung der Platten verändert. Die Elektromotoren sind im Unterbein montiert, damit die Masse des hochbeschleunigten Fußes niedrig bleibt.



Bild 2.5: Aufbau des Fußes nach [49]

2.3 Zehengelenkskonstruktionen

Die meisten humanoiden Roboter verwenden monolithische Füße. Diese besitzen gegenüber Füßen mit Zehengelenken weniger Masse und einen einfacheren Aufbau, schränken den Bewegungsspielraum jedoch stark ein. Fersenheben mit monolithischen Füßen ist fast nicht möglich, da ein Linienkontakt mit dem Boden durch die Fußkante entsteht und dieser instabil ist und keine stabilisierenden Drehmomente quer zur Laufrichtung übertragen kann [31]. Zehengelenke werden in aktive und passive Zehengelenke unterteilt. Zunächst werden Vor- und Nachteile der zwei Prinzipien vorgestellt. Nachfolgend wird genauer auf konkrete Zehenkonstruktionen eingegangen.

[32] führt einige Experimente mit den Robotern H6 und H7 durch, um den Einfluss aktiver Zehengelenke zu testen. Durch die Zehengelenke wird die Schrittgeschwindigkeit um achtzig Prozent erhöht, die Winkelgeschwindigkeiten im Knie wurden um die Hälfte reduziert. Durch das Zehengelenk wird beim Treppensteigen der Torso angehoben, während das Zehensegment des Standfußes noch in Kontakt mit dem Boden ist. Dadurch wird die Beugung des Knies reduziert und das Steigen höherer Stufen ermöglicht. Das Bewegungsrepertoire wird erweitert. Der Roboter richtet sich aus einer Position auf, bei der Knie und Zehensegment den Boden berühren. Das Knien auf dem Boden gilt als eine der wichtigsten Ganzkörperbewegungen für Humanoide Roboter, da so eine hohe Stabilität gegen Umfallen erreicht wird und viele Freiheitsgrade noch steuerbar sind.

[1] vergleicht mit einer Simulation den Gang von Robotern mit und ohne aktivem Zehengelenk. Auch hier wird eine erhöhte Schrittgeschwindigkeit durch eine mehr als doppelt so große Schrittlänge und eine Reduzierung der Winkelgeschwindigkeiten beobachtet. Simulationen von [7] bestätigen diese Aussagen. Weiter wird die bipedale Standphase um zehn Prozent verlängert und ein dem Menschen ähnlicherer *Heel-contact and toe-off-*Gang erreicht. Dabei wird die vertikale Verschiebung des Torsoschwerpunkts reduziert [26]. Die Steuerbarkeit zum Abheben des Fußes wird verbessert und das Schwungbein kann eine nahezu ausgestreckte Haltung annehmen.

[41] untersucht Trajektorien zum Treppauf- und Treppabsteigen und zeigt, dass ein aktives Zehengelenk größere Steigungen erlaubt. Beim Treppensteigen wird im Bein, das die nächste Stufe berührt, beim Anheben des Torsos das größte Drehmoment verursacht. Mit einem aktiven Zehengelenk wird der Torso angehoben, bevor der Fuß abhebt, und der Kniewinkel wird verringert. Die Singularität des Kniegelenks wird durch das Zehengelenk erst bei höheren Treppenstufen erreicht. Eine Singularität ist das Erreichen der Konfiguration am Rand des Arbeitsbereiches, wodurch Freiheitsgrade verloren gehen, wie beispielsweise beim Durchstrecken des Knies. Durch das aktive Zehengelenk wird sozusagen die zur Verfügung stehende Beinlänge vergrößert.

Passive Zehengelenke sind leicht, simpel und das Fersenheben muss nicht gesteuert werden [31]. Das Gewicht des Fußes ist kritisch, da der Fuß die größten Beschleunigungen erfährt und damit die Dynamik maßgeblich bestimmt. Aber sie verursachen wie monolithische Füße eine unteraktuierte Phase am Ende der Singlesupportphase, da sie keine Momente über die laterale Achse auf den Boden transferieren können.

2.3.1 Passive Zehengelenke

Da es nach dem Wissen des Autors neben dem Laufroboter LOLA nur drei andere menschengroße Laufroboter mit aktivem Zehengelenk gibt, werden auch einige passive Zehengelenke beschrieben. [19] beschreibt einen Fußmechanismus, der die Bogenstruktur des menschlichen Fußes nachahmt. Dazu wird zunächst zum Verständnis die Biomechanik erläutert. Die Bogenstruktur im Fuß hilft dem Standbein das Gewicht zu stemmen. Weiter unterstützt es die Aufpralldämp-



Bild 2.6: Der Windlassmechanismus in den vier Gangphasen nach [19]

fung beim Erstauftreffen der Zehe und der Anpassung an den Untergrund. Der menschliche Fuß besteht aus drei Gewölben: das medial longitudinale Fußgewölbe, das lateral longitudinale Fußgewölbe und das transversale Fußgewölbe [25]. Das medial longitudinale Fußgewölbe ist wegen seiner Höhe und der Anzahl kleiner Gelenke zwischen den einzelnen Teilen elastisch. Das lateral longitudinale Fußgewölbe ist eingeschränkt beweglich, solide, und ist in Relation zum medial logitudinalen Fußgewölbe leicht erhöht. Das transversale Fußgewölbe ist elastisch, um sich den Unebenheiten des Bodens anzupassen und kann die Bogenstruktur nicht erhalten, wenn große Belastung beim Gehen einwirkt. Das Zusammenwirken der Bogenstrukturen wird im Folgenden mit dem Fußmechanismus von [19] erläutert.

Die Größe und Position der einzelnen Gelenke entsprechen dem menschlichen Fußaufbau. Der Fuß hat die Dimensionen eines menschlichen Fußes und besitzt eine mediale Zehenachse (1) und eine Fußbogenachse (2), wie in Abbildung 2.6 zu sehen ist. Die mediale Zehenachse und die Bogenachse sind mit einem Kabel (3) verbunden, was den Plantar Aponeurosis darstellt, der den Windlass-Mechanismus imitiert. Der Windlass-Mechanismus veranlasst eine Bogenerhöhung, wenn das Kabel durch Aufrollen verkürzt wird. Der medial plantare Fußbogen trifft in Gangphase Zwei auf einen Polyurethan-Dämpfer (4) mit Shore Härte A 30 und in Gangphase Drei in der anderen Richtung auf einen Polyuerthan-Dämpfer (5) mit Shore Härte A 70, um verschiedene Dämpfungskonstanten zu imitieren. Die Effektivität der Stoßdämpfung wurde mit Experimenten verifiziert. Der Windlass-Mechanismus bewirkt außerdem eine Bogenerhöhung in der finalen Gangphase und drückt den Fuß so stärker vom Boden ab.

[22] entwickelt ein passives Zehengelenk mit Federmechanismus für den Humanoiden *HRP-2LT*, um kinetische Energie zu speichern. Dabei wurde eine Drehfeder direkt in die Zehenachse integriert. Durch die Gewichtskraft wird die Feder gespannt. Beim Abheben des Fußes wird die Energie freigesetzt. Mit dieser Konfiguration ist es dem Roboter möglich zu springen.

[48] entwickelt einen vierstängigen Mechanismus, der die radiale Last auf das Zehengelenk verringert. Der Fuß liegt, inspiriert durch den menschlichen Fuß, beim Abheben der Ferse auf *Zehenballen* und *Zehenspitze* auf, siehe Abbildung 2.7. Durch den vierstängigen Mechanismus verändern die Auflagepunkte den Abstand zueinander nicht. Während des Anhebens bewegt sich der Roboter durch das Abrollen auf den halbrunden Kontaktflächen minimal nach vorne.

2.3.2 Aktive Zehengelenke

[32] entwickelt das aktive Zehengelenk für den Roboter H7. Die Achse des Zehenaktors ist nahezu in der Mitte über der Zehenplatte angebracht. Das hat den Vorteil, dass ein zweiseitiges Drehmoment durch das Zehengelenk aufgebracht wird. Der Zero-Moment-Point (ZMP), der Punkt, an



Bild 2.7: Der vierstängige Mechanismus nach [48]

dem die Kontaktkräfte keine Drehmomente in horizontaler Richtung bewirken, und der sich bei erfolgreicher Regelung innerhalb des Unterstützungspolygons aufhält, befindet sich meist in der Mitte des Supportpolygons. Der kürzere Hebelarm verringert daher das benötigte Drehmoment. Dies führt zu einem leichteren und kleineren Motor, der direkt an der Zehenachse verbaut wird. Der Nachteil dieses Designs ist das Spiel im Planetengetriebe, da beidseitiges Drehmoment benötigt wird. Allerdings werden heutzutage bei Robotern fast ausschließlich Harmonic Drive Getriebe verwendet, die kaum Spiel aufweisen.

2.4 Bodentopologieerfassung

In diesem Abschnitt werden verschiedene Messprinzipien zur Erfassung des Bodenprofils vorgestellt. Die Kenntnisse des Bodenprofils befähigt den Roboter beispielsweise vor Bodenkontakt den Fuß abzubremsen und so Aufprallkräfte zu reduzieren, die Trajektorie zu ändern und Hindernissen auszuweichen oder die Fußstellung an den Boden anzupassen, um ein größeres Unterstützungspolygon aufzuspannen.

[21] benutzt Ultraschallsensoren, um die Distanz zum Boden zu messen. Die Sensordaten werden in eine einfache Repräsentation des Bodenprofils in Echtzeit übersetzt. Es ist schwierig, schräge Oberflächen mit Ultraschallsensoren zu messen. Daher beschränkt sich [21] auf Stufen und Ebenen. Ein solches Terrain wird als *Horizontally Composed* (HC) bezeichnet [4]. Der verwendete Sensor (Keyence, UD-1130) wurde an ein 30 cm hervorstehendes Rohr angebracht, das an der Hüfte befestigt ist. Der Sensor hat einen Messdurchmesser von 2 mm mit einer Auflösung von 0.3 mm. 9° Abschrägung der zu erkennenden Oberflächen sind erlaubt. Aus den Daten wird in Echtzeit eine Karte der Bodentopologie erstellt. Die Bodenhöhe ergibt sich dabei aus dem Sensorwert abzüglich der aus Gelenkstellungen errechneten Höhe. Die Werte werden alle 10 ms aufgenommen und in ein Array eingespeichert. Aufgrund der Karte wird ausgewählt, wohin der Schritt gemacht wird, um nicht schräg aufzutreten. Die 30 cm Abstand von Roboter und Ultraschallsensoren dienen als Puffer, um die veränderten Trajektorien rechtzeitig umzusetzen. Da bei den Versuchen nur ein 40 cm hoher Roboter *Meltran* benutzt wurde, muss dies bei Übertragung des Messprinzips auf Lola berücksichtigt werden.

Johnnie, der Vorgänger von Lola, besitzt vier abgeschrägte gummiüberzogene Kontaktelemente je Fuß [31]. Zwischen oberer und unterer Fußplatte sorgt ein Dämpferblock aus viskoelastischem Material für Stoßdämpfung. Lineare Potentiometer messen die Deformation des Dämpfungsblocks. Ein passiver rotatorischer Freiheitsgrad zwischen vorderen und hinteren Kontaktelementen macht den Fuß-Boden Kontakt statisch bestimmt und kompensiert kleinere Unebenheiten des Untergrunds. Unter Scherbelastung ist der Dämpfungsblock sehr nachgiebig, was Instabilität verursacht und Messergebnisse verfälscht. Die Deformation des Blocks durch Querkräfte limitiert die Steuerungsbandbreite. Daher wurde der Fuß durch einen einfacheren mit vier nadelförmigen Kontakten ersetzt. Die Scherung durch Tangentialkräfte wird durch eine Schienenlagerung, die nur vertikale Verschiebung zulässt, verhindert. Die Messwerte der Potentiometer dienen der Berechnung der relativen Stellung zwischen den Kontaktelementen und der oberen Platte.

[24] entwickelt einen Fuß, der sich unebenem Terrain anpasst, indem die Bodentopologie gemessen wird und der Fuß sich aktiv der Oberfläche anpasst. Der Fuß besteht aus einer steifen Platte (1) mit vier vertikal verschiebbaren Stäben (2) als Kontaktelemente, siehe Abbildung 2.8. Diese ragen 20mm nach unten heraus, um mit 20mm hohen Unebenheiten zurechtzukommen. Die Stäbe treffen zuerst auf. Die Verschiebung der Stäbe wird durch optische Sensoren (3) gemessen. Von der Fußplatte wird ein Lichtstrahl ausgesendet, der vom am Stab befestigten Spiegel reflektiert wird. Durch den Zeitunterschied wird der Abstand gemessen. Eine Feder (4) zieht den Stab in der Schwungphase wieder nach unten. Der Bewegungsraum der Stachel in vertikaler Richtung ist mit 7 mm experimentell festgelegt worden. Die optischen Sensoren wurden ausgewählt, da diese nur einen Prozent Messfehler aufweisen, leichter und kleiner sind als lineare Encoder. Die Lichtsensoren sind abgedeckt, um vom externen Licht nicht beeinflusst zu werden. Der Fuß wählt je nach detektierter Oberfläche einen 3-Punkt-Kontakt mit dem Boden, da ein 4-Punkt-Kontakt mit steifer Fußplatte auf unebenen Terrain fast unmöglich ist. Auf ebener Fläche ist der 4-Punkt-Kontakt besser, da das Unterstützungspolygon doppelt so groß ist.

Um sich dem unebenen Terrain anzupassen, wird bei initialem Kontakt erst softwareseitig ein Supportpolygon ausgewählt, dann das Laufmuster entlang der vertikalen Achse, dann um Kippund Roll-Achse angepasst. In den Experimenten passt sich der Fuß Schrägen von 7° und Unebenheiten von 15 mm erfolgreich an. Allerdings kann sich der Fuß durch die Punktkontakte keinem weichen Untergründen, wie Sand, anpassen.

2.5 Adaption an unebenes Terrain

Die meisten Methoden, die humanoide Laufroboter zum stabilen Laufen verhelfen sollen, basieren auf der Annahme, dass der Fuß in der einbeinigen Standphase vier Kontaktpunkte mit dem Boden hat [16]. Beim Auftreten eines flachen steifen Fußes auf Hindernisse wird jedoch meist ein Unterstützungspolygon aus drei Kontaktpunkten aufgespannt, dass eine kleinere Fläche besitzt, siehe Abbildung 2.9 links. Bei der Regelung humanoider Roboter muss der Zero Moment Point (ZMP) innerhalb des Unterstützungspolygons gehalten werden, damit er Roboter nicht umkippt.



Bild 2.8: Aufbau des Fußes nach [24]

Der ZMP ist der Punkt, an dem die Kontaktkräfte keine Drehmomente in horizontaler Richtung bewirken [44]. Daher ist es für die Regelung wichtig, dass das Unterstützungspolygon möglichst groß ist.

Große Unterstützungspolygone werden aufgespannt, wenn sich der Fuß dem Boden anpasst und weit auseinanderliegende Kontaktpunkte erzeugt. Dies kann beispielsweise durch stark nachgiebige Kontaktelemente erreicht werden, siehe Abbildung 2.9 rechts. Nachgiebiger Fuß-Boden-Kontakt macht den Roboter unteraktuiert, das bedeutet, das System hat mehr Freiheitsgrade als gesteuert werden [7]. Eine Lösung dafür ist es, die Nachgiebigkeit des Bodenkontakts zu steuern. Im ersten Abschnitt werden Konzepte präsentiert, die diese Freiheitsgrade bei hergestelltem Fuß-Boden-Kontakt sperren. Im zweiten Abschnitt wird ein Konzept vorgestellt, das die Nachgiebigkeit zumindest reduzieren kann.

2.5.1 Anpassung durch sperrbare Freiheitsgrade

[16] entwickelte ein Fußsystem, das Unebenheiten von 20 mm ausgleicht und einen 4-Punkt-Kontakt mit dem Boden herstellt. Jeder der vier Kontakte pro Fuß lässt sich in vertikaler Richtung verschieben und sperren. So kann die Fußplatte waagrecht bleiben, siehe Abbildung 2.9. Die vier Mini-Füße lassen sich mit einem Exzenter-Mechanismus schließen. Der Exzenter (1) rotiert mit dem Fuß, bis er den eingeschobenen Keil (2) berührt und so in der Bewegung behindert wird, siehe Abbildung 2.10. Der Keil jeden Mini-Fußes wird durch einen Hubmagnet eingeschoben, wenn alle Mini-Füße Kontakt mit dem Boden haben und die geforderte Fußhöhe erreicht wurde. Der Kontakt mit dem Boden wird über einen Druckschalter gemessen, der in der Spitze jeden Mini-Fußes verbaut ist. Verlässt der Fuß den Boden wieder werden die Hubmagnete in die andere Richtung gepolt, der Keil und die Mini-Füße nehmen durch eine Feder wieder ihre Ursprungsposition ein. Nachteilig ist jedoch, dass die Beine durch die Rotation des Exzenters beim Absenken verrutschen, wie in Abbildung 2.10 dargestellt ist. Weiterhin kann sich der Fuß nicht an konvexe Untergründe anpassen [18].

Die Weiterentwicklung des Sperrkonzeptes von [18] verhindert diese Nachteile. Das Kontaktelement mit Keilform (3) bewegt sich bei Bodenkontakt nach oben, siehe Abbildung 2.10. Wenn der Fuß die gewünschte Bodenhöhe erreicht hat, wird der Exzenter (4) mit einem Motor rotiert, bis er auf den Keil trifft. So wird dieser an der Weiterbewegung gehindert. Die Effektivität der Sperrung basiert auf der Form des Exzenters und dem Reibungskoeffizienten des Haftkontakts. Durch die längeren stiftförmigen Kontaktelemente ist auch die Anpassung an konkave Untergründe möglich.



Bild 2.9: Links: Unterstützungspolygon mit steifer Sohlenplatte. Rechts: Größtmögliches Supportpolygon durch nachgiebigen Fuß-Boden-Kontakt [16]



Bild 2.10: Links: Sperrmechanismus durch aktuierten Keil nach [16]. Rechts: Sperrmechanismus durch aktuierten Exzenter nach [18]

2.5.2 Anpassung durch Feder

[9] präsentiert einen Zehenmechanismus der auf einstellbarer Nachlässigkeit der Zehen basiert. Die nachgiebigen Zehenkontakte dienen der Aufprallabsorption beim Landen und der Energieeffizienz. Eine einstellbare Federkonstante passt die Federsteifigkeit bei Bedarf an. Um sich besser dem Boden anzupassen, werden zwei unabhängig voneinander einstellbare Zehenkontakte angebracht. Der Fuß besteht aus Titan-Blattfedern (1), jeweils einem Roll-Schieber-Kurbel-Mechanismus (2), den zwei Zehen-Kontaktelementen aus Gummi (3) und einem Fersen-Gummiball als drittem Kontaktpunkt (hier nicht dargestellt), siehe Abbildung 2.11. Ein kleiner Motor (4) (Maxon Geared Motor) ist implementiert, um die Kurbel (5) anzutreiben. Die Kurbel verschiebt die Rolle auf der Blattfeder und verändert damit die Federkonstante. Die Fußplatte unter der Blattfeder sorgt dafür, dass die Rolle bei Biegung der Blattfeder nicht zurückgeschoben wird, da die Kraft so nur in vertikaler Richtung auf den Roller wirkt. Das durch Elastizität des Zehengelenks verursachte Spiel bewirkt schwierigere Steuerbarkeit des Torsos, da Drehmomente mit Verzögerung auf den Boden übertragen werden.



Bild 2.11: Aufbau des einstellbaren Federmechanismus nach [9]

Kapitel 3

Anforderungen und Designkonzept

In diesem Kapitel wird das Designkonzept anhand der Anforderungen abgeleitet. Als Orientierung und Entwicklungsunterstützung wird das Münchner Vorgehensmodell (MVM) angewendet, siehe Abbildung 3.1. Zunächst wird der Schritt des MVM *Ziel analysieren* durchgeführt, indem Anforderungen an das Gesamtsystem Fuß aufgestellt werden. Wie in der Problemstellung aus Kapitel 1.3 erwähnt sind drei grundlegende Anforderungen vorgegeben. Die Leistung des Zehengelenks wird erhöht, um neue Bewegungsmuster, wie das Herabsteigen einer Treppe zu ermöglichen. Die Kontaktfläche zum Boden wird durchgängig gestaltet, sodass keine Hindernisse, wie Steine zwischen den Kontaktflächen auftreffen. An die Sohle soll eine flächige Sensormatte angebracht werden, die den Bodenkontakt misst. Der Fuß wird mit weiteren Sensoren ausgestattet, um den Abstand zum Boden vor dem Auftreffen zu messen. Aufgrund dieser Daten ist es möglich die Fußtrajektorie anzupassen und große Aufprallkräfte zu vermeiden. Gemäß des Schrittes *Problem strukturieren* des MVM wird die Entwicklung auf die drei Problembereiche Zehenantrieb, Kontaktfläche und Bodentopologieerfassung aufgeteilt. Dies dient der Reduzierung der Komplexität und verschafft Überblick.



Bild 3.1: Münchner Vorgehensmodell nach [Lindemann.2010]

Zunächst werden die Anforderungen des gesamten Fußes festgehalten, um den Zielzustand zu definieren. Die darauffolgenden Abschnitte sind nach den Problembereichen aufgeteilt. In jedem Abschnitt werden gemäß dem MVM *Lösungsalternativen erarbeitet, Eigenschaften der Lösungen ermittelt* und dann eine *Entscheidung herbeigeführt*. Die Teilkonzepte werden zum Abschluss des Kapitels zu einem Gesamtkonzept zusammengeführt.

3.1 Anforderungen

Eine befriedigende Lösung für eine Fußkonstruktion bei humanoiden Laufrobotern zu entwickeln ist aufgrund gegensätzlicher Anforderung eine Herausforderung. Auf der einen Seite muss der Fuß nachgiebig sein, um sich kleinen Unebenheiten des Untergrundes anzupassen und die Aufprallkraft bei Fuß-Boden-Kontakt zu dämpfen. Die Aufprallkräfte, die bei initialem Kontakt mit dem Boden auftreten, sind um das Vielfache größer als die Gewichtskraft des Roboters. Ist die Dämpfung zu gering, werden diese direkt an die Struktur des Roboters weitergeleitet und verursachen Instabilität und Schwingungen. Auf der anderen Seite wird eine hohe Steifigkeit benötigt, um eine Verschiebung des Schwerpunktes durch Nachgiebigkeiten zu verringern und die regelnden Momente effektiv auf den Boden zu übertragen. Komprimiert sich beispielsweise die nachgiebige Sohle an der Zehe durch höhere Belastung stärker als die Sohle der Ferse, führt dies zur Neigung des Roboters nach vorne und somit einer Schwerpunktverschiebung, die wiederum ausgeregelt werden muss. [7] beschreibt, dass Kontaktkräfte und Torsoneigung sensitiv auf Änderungen der Steifigkeit und der Dämpfung des Fuß-Boden-Kontakts reagieren. Die Sohle bei Lola verursacht die größten Nachgiebigkeiten. Die regelnden Momente werden bei geringer Steifigkeit mit Verzögerung an den Boden übertragen, da erst der, durch das nachgiebige Material verursachte, Spielraum überwunden werden muss. Eine progressive Dämpfung sichert die effektive Steuerbarkeit. [31] [29] empfehlen die Dämpfung experimentell zu bestimmen. Um eine experimentelle Einstellung des optimalen Verhältnisses zwischen Nachgiebigkeit und Steifigkeit zu erreichen, ist eine einstellbare Dämpfung zu empfehlen.

Der Aufbau des Fußes und die Antriebskinematik sollen einfach gestaltet werden, um die Komplexität zu senken und Gewicht zu sparen. [29] betont bei der Entwicklung der Fußkonstruktion, dass die Größe und das Gewicht des Fußes für die Stabilität des Roboters maßgeblich sind. Die Füße sind die am höchsten beschleunigten Glieder und beeinflussen die Dynamik signifikant. [10] sieht leichte Strukturen, die Kräften und Momenten standhalten und den verfügbaren Bauraum als Anforderungen an Fußdesigns. Massen sollten nahe der Achsen liegen, um die sie beschleunigt werden, um die Trägheitsmomente gering zu halten. Ein modulares Design ist sinnvoll, um die Möglichkeit zu haben verschiedene Konfigurationen in Experimenten zu testen, den Fuß zu erweitern oder Teile zu ersetzen.

Bei stark unebenen Terrain wird nicht sichergestellt, dass die Ferse zuerst aufkommt. Daher muss die Fußkonstruktion auch punktuellen und damit örtlich hohen Belastungen standhalten. Die erreichbaren Fußstellungen müssen einen drei-Punkt-Kontakt mit dem Boden erlauben, um ein Unterstützungspolygon aufzuspannen. Da sich der ZMP (Zero Moment Point) bei einer erfolgreichen Regelung innerhalb des Polygons befinden muss, ist ein möglichst großes Unterstützungspolygon von Vorteil. Weiter soll die Sohle eine rutschfeste und griffige Verbindung auf verschiedenen Oberflächen herstellen. Die Kontaktflächen müssen guten Bodenkontakt haben und effektiv Momente an den Boden übertragen, da die Regelung darauf beruht, dass der Roboter nicht rutscht und die tangentiale Kontaktsteifigkeit hoch ist [31]. Um hohen Belastungen standzuhalten, ist die Sohle reißfest und robust auszulegen.

Der Zehenaktor benötigt viel Leistung, um die Momente aufzubringen, die das Gewicht des Roboters heben. Das Stehen auf der Zehe oder das Treppensteigen sind Beispiele. Eine Steigerung der Übersetzung des Getriebes ist nicht unbegrenzt möglich, da die benötigte Mindest-Drehgeschwindigkeit des Zehengelenks erreicht werden muss. Eine Steigerung der Leistung des Motors bewirkt durch die größere Dimensionierung eine Erhöhung der Masse des Fußes. Dies beeinträchtigt die Dynamik, da die Masse des Fußes beim Gehen beschleunigt werden muss und der Fuß die Baugruppe mit der größten Beschleunigung ist. Die Übersetzung des Motormoments über Getriebe auf den Boden muss möglichst spielfrei sein, um ungewolltes Neigen des Roboters zu verhindern. Der Zehenantrieb muss Anstellwinkel von 0 bis 60 Grad erlauben, um mehrere Bewegungsmuster umzusetzen.

Die Sensoren zur Erkennung des Abstandes zum Boden sollen so angebracht werden, dass die gesamte Fläche, auf die der Fuß auftrifft, gescannt wird. Eine modulare und einfach modifizierbare Halterung für Experimente ist sinnvoll. Grundlegend ist neben modularer Gestaltung der Änderungsaufwand gering zu halten. Dadurch werden nicht nur Arbeitsresourcen gespart, sondern auch änderungsinduzierte Risiken vermieden. Wegen der hohen Komplexität des Roboters verursachen Umgestaltungen Auswirkungen auf viele andere Bereiche. Eine Verlängerung des Unterschenkels hat beispielsweise Auswirkungen auf Gewicht, Trägheitsmomente, Dynamik, Regelung, Bewegungsraum und weitere. Beschränkungen des Bauraumes durch andere Körperteile sind zu beachten. Anthropometrische Abmaße sollen eingehalten werden.

Zusammenfassend sind maßgebliche Anforderungen:

- Nachgiebiger Bodenkontakt, um sich Unebenheiten anzupassen und Aufprallkräfte zu dämpfen
- Ausreichende Steifigkeit, um regelnde Momente zu übertragen
- Passive progressive Dämpfungselemente für effektive Momentübertragung
- Einstellbare Dämpfung
- Großes Supportpolygon
- Griffiger Bodenkontakt auf verschiedenen Oberflächen
- Leistung des Zehenaktors ausreichend für Zehengehen
- Leichter einfacher Aufbau
- Erlaubten Bauraum beachten, wenn möglich anthropometrisch
- Modulares Design
- Anbringung von Sensoren zur Erkennung der Bodentopologie

3.2 Zehenantrieb

Gemäß dem MVM werden, nach der Festlegung der Anforderungen an den Fuß, Lösungen für die Teilbereiche generiert. Dabei wird zunächst möglichst offen nach neuen Lösungen gesucht und die generierten Lösungsideen nach Realisierbarkeit aussortiert. [Lohmeier.2010 S.168] sieht Potential zur Verbesserung der Fußkonstruktion darin, die Massenträgheit zu reduzieren, da der Zehenaktor signifikant zur Dynamik des Gesamtsystems beiträgt. Da bei der geforderten Erhöhung der Zehenleistung auch das Gewicht des Aktors steigt, erhöht sich das Trägheitsmoment zusätzlich. Daher werden Lösungen gesucht, die eine Verlegung des Aktors nach oben erlauben. Da es kaum Roboter mit angetriebener Zehe gibt, wurden die Konzepte neu entwickelt. Hilfsmittel bei der Entwicklung waren Internetrecherchen und Konstruktionsbücher zu verschiedenen Antriebskonzepten und Bewegungsmechaniken. Abbildung 3.2 zeigt sieben Designs zum Antrieb des Zehengelenks, die im Folgenden untersucht werden.

Lösung Z1 verringert das Trägheitsmoment des Gesamtsystems, da der schwere Motor nahe des Kniegelenks sitzt. Über einen Keilriemen wird die Antriebsbewegung an das Sprunggelenk übertragen. Durch die starke Neigung des Fußes muss der Keilriemen elastisch sein. Der geringe sphärische Bauraum von 30 mm Durchmesser im Universalgelenk des Sprunggelenks verhindert die Umsetzung, siehe Anhang A.1.1. Da Bauraum im Roboter knapp ist und die Änderung großer Strukturteile, wie das Beinsegment, teuer und aufwendig ist, wird die Einhaltung des zur Verfügung stehenden Bauraums zum ausschlaggebenden Kriterium für das Ausscheiden der Lösungen. Die dynamischen Anforderungen bei Lola haben weniger Priorität als der Aufwand zur Änderung



Bild 3.2: Mögliche Lösungen des Zehenantriebs

der Unterschenkelstruktur und des Sprunggelenkstrukturteils. Zusätzlich steigt mit mehr Änderungen und gegenseitiger Beeinflussung der Segmente auch das Risikopotential. Weiter handelt es sich um eine parallele Kinematik, da beispielsweise bei einer Flexion des Fußes das Zehengelenk mit geneigt wird. Der Zehenaktor müsste gegensteuern um die Sohle waagrecht zu halten. Dies hat neben der komplexen Regelung den Nachteil, dass das System überbestimmt ist, was zu Spannungen führen kann.

Die Lösungen Z2, Z3 und Z4 haben wie Lösung Z1 den Nachteil der parallelen Kinematik. Eine kinematische Analyse stellt heraus, wie groß die Verschiebewege und Hebelweiten sein müssen, um den Arbeitsraum der Zehe abzudecken. Dazu wurde ein Software-Werkzeug mit dem Geometrieprogramm *Geogebra* entwickelt. Das zweidimensionale Skelettmodell von Lolas Beinen ist maßstabsgetreu in einem Koordinatensystem dargestellt, siehe Abbildung 3.3. Die Sohle ist fixiert, Vorderfuß und Unterschenkel können in ihrem Arbeitsraum bewegt werden. Die jeweiligen Kinematiken der Lösungen Z2, Z3 und Z4 werden modelliert und die Freiheitsgrade mit geometrischen Bedingungen eingeschränkt. Nun können Zehengelenk- und Sprunggelenkwinkel variiert und die Hubwege abgelesen werden. Dabei wird der maximale Arbeitsraum des Zehengelenks und des Sprunggelenks beachtet, die der Arbeit von [31] entnommen sind. Es können mehrere Konfigurationen ausprobiert werden, indem die verschiedenen Parameter variiert werden. Beispielsweise wird die Position von Auflagepunkt *E* oder die Länge der Stange *e* geändert, um zu testen ob der Hubweg des Linearantriebs kleiner wird. Das Ergebnis der kinematischen Analyse der Lösungen Z2, Z3 und Z4 ist, dass die Verschiebewege und Hebelweiten zu groß sind, um sie an der vorhandenen Unterschenkelkonstruktion von Lola anzubringen. Des Weiteren sind die anthropometrischen Abmessungen nicht erfüllt und die Kinematik ist bei einem Sturz durch die Exponiertheit außerhalb der Unterschenkelstruktur nicht geschützt.



Bild 3.3: Extreme Gelenkstellungen des Arbeitsraums zur Bestimmung der Hublänge bei Lösung Z2

Eine interessante Lösung ist stellt Option Z5 dar, da durch die Nutzung des Bowdenzugs keine parallele Kinematik entsteht. Damit es möglich ist Drehmomente in beide Richtungen zu übertragen, ist ein Doppelzug nötig. Dieser wird vorgespannt, um das Spiel zu verringern. Allerdings wird vollständige Spielfreiheit durch den Abstand von Seele und Hülle im Bowdenzug nicht erreicht. Die Reibung über die Länge des Bowdenzugs verringert den Wirkungsgrad. Der benötigte Bauraum ist groß. Bei einer Hebellänge von 80 mm und einem Biegeradius von 150 mm und einer Einbaulänge von 85 mm werden maximal Drehmomente von 45 Nm erreicht, was dem bisherigen Drehmoment des Zehengelenks entspricht. Die Rechnung dazu findet sich im Anhang A.1.2.

Lösung Z6 hat die gleichen Vorteile wie Lösung Z5. Eine parallele Kinematik und Überbestimmtheit des Systems wird verhindert, da das Kardangelenk genau in der Mitte des Universalgelenks liegt. Eine Neigung des Sprunggelenks hat keinen Einfluss auf die Rotation der Kardanwelle respektive des Zehengelenksantriebs. Um den Motor anzubringen ist eine Veränderung der Unterschenkelstruktur nötig. Das Sprunggelenkstrukturteil müsste größer dimensioniert werden, um den Einbau von Kegelrädern zu erlauben. Daher scheidet diese Lösung aus.

Eine Motoranbringung direkt im Zehengelenk, wie es Lösung Z7 zeigt, wird übernommen. Zwar ist der schwere Motor direkt im Fuß verbaut und dadurch das Trägheitsmoment hoch, aber die Vorteile überwiegen. Es gibt keine langen parallelen kinematischen Ketten, durch eine Harmonic-Drive-Übersetzung werden Momente spielfrei übertragen, die Bauweise ist einfach und kompakt, der Bewegungsradius wird nicht eingeschränkt und es existieren Erfahrungswerte, da diese Art Antrieb aktuell in Verwendung ist. Ein modularer Aufbau ist gut möglich, da der Aktor an den Flansch des Kraft-Drehmoment-Sensors angebracht werden kann. Bei der Verwendung einer passiven Zehe oder eines monolithischen Fußkonzeptes wird dieser einfach abgeschraubt.

Unabhängig davon, wo der Aktor sitzt, ist die Anbringung einer Drehfeder in der Zehenachse interessant, da diese beispielsweise der Gewichtskraft entgegenwirkt und somit das vom Motor benötigte Drehmoment heruntersetzt. Um die Effektivität und Effizienz der Anbringung einer Drehfeder zu untersuchen, wird das Lastprofil benötigt. Daher wird in Kapitel 4 bei der Motorauswahl genauer darauf eingegangen. Für das Designkonzept ist eine Möglichkeit der Anbringung und eine modulare Gestaltung zur einfachen Montage und Demontage für Experimente zu be-

rücksichtigen.

3.3 Sohle

Die Hauptanforderung an die Sohle ist, dass die gesamte Fläche unter dem Fuß mit einer Sensorschicht ausgestattet wird, um Bodenkontaktdaten zu sammeln. Dies hat einige Vorteile. Steine oder kleine Hindernisse können nicht zwischen die Kontaktelemente geraten und auf die Fußstruktur auftreffen. Durch die flächige Auslegung sinkt der Roboter bei weichem Untergrund, wie Sand, im Gegensatz zu Punktkontakten weniger ein. Die gesammelten Daten dienen als Input für die Regelungssoftware, wodurch die Möglichkeit besteht, sich durch Nachregeln der Fußstellung in Echtzeit an Bodenbegebenheiten anzupassen. Nachteil ist, dass durch die Vorgabe einer durchgängigen Sohle der Designraum stark eingeschränkt wird. Physische Anpassung an Bodengegebenheiten durch punktförmige Kontakte, wie bei den sperrbaren Stäben von [18] ist somit nicht möglich. Auf unebenen Untergrund ist meist das Supportpolygon bei flächigen Füßen kleiner wie an Abbildung 2.9 in Abschnitt 2.5 gezeigt wurde.

Neben der flächigen Auslegung, ist bei der Sohle die Dämpfung kritisch. Da nicht viel über die Dämpfungseigenschaften der Ausgangsfußkonstruktion bekannt ist, liegt es nahe Untersuchungen in der Mehrkörpersimulation (MKS) durchzuführen. Da einige Fußkonstruktionen [20, 47] nur vertikal verschiebliche Dämpfung nutzen, wurde zunächst der Einfluss der seitlichen Steifigkeit untersucht. Dazu wurde der Koeffizient der seitlichen Steifigkeit in der MKS-Simulation verändert. Als Stabilitätskriterium wird die Torsoneigung verwendet. Das Ergebnis in Abbildung 3.4 zeigt, dass eine gewisse seitliche Steifigkeit von Vorteil ist. Eine Sperrung der horizontalen Verschieblichkeit, wie bei [20, 47] ist nicht empfehlenswert.

Der verwendete Industriestoßdämpfer zeigt annähernd lineares Verhalten. Um eine Verbesserung der Stabilität bei progressiver Dämpfung zu untersuchen, wurde ein Modell des Stoßdämpfers in die Simulation integriert. Dazu wurden die vier Kontaktpunkte der Ferse mit linearem und progressiven Dämpfungsverhalten beaufschlagt. Nach einer Kompression von 10 mm wirkt nur noch die Dämpfung und Elastizität der Kontaktelemente, um die Begrenzung des Hubs durch den Endstopp zu simulieren. Anhand der Krafteinwirkung auf die Kontaktelemente und der Torsoneigung sollen Schlüsse auf die Effektivität der Dämpfung gegeben werden. Das Ergebnis in Abbildung 3.5 zeigt zwar Unterschiede, jedoch sind keine Rückschlüsse möglich, da das Regelverhalten im



Bild 3.4: Vergleich der Torsoneigung des Roboters bei verschiedenen seitlichen Steifigkeiten der Sohle



Bild 3.5: Vergleich der Torsoneigung des Roboters bei linearen und progressiven Dämpfungseigenschaften des Industriestoßdämpfers

Vergleich zur ursprünglichen Simulation ohne Stoßdämpfer signifikant verschlechtert wird. Dies liegt vermutlich daran, dass die Regelung auf ein Modell ohne Stoßdämpfer optimiert wurde. Dies würde erklären, warum der Industriestoßdämpfer bei Lola durch eine steife Verbindung ersetzt wurde. Eine ausführliche Analyse, die Integrierung und Optimierung eines Dämpfermodels übersteigt den Rahmen dieser Arbeit, ist aber weiterführend zu empfehlen.

Die folgenden Lösungen in Abbildung 3.6 stellen Konzepte zur Dämpfung der Sohle vor. Wie bei den Anforderungen erläutert, ist die Dämpfung überlegt zu wählen, da höhere Dämpfung die Nachgiebigkeit erhöht. [7] beschreibt, dass Kontaktkräfte und Torsoneigung sensitiv auf Änderungen der Steifigkeit und der Dämpfung des Fuß-Boden-Kontakts reagieren. Die Sohle bei Lola verursacht die größten Nachgiebigkeiten. Diese wirken sich auch besonders stark aus, da eine kleine Winkelveränderung des Fußes eine große Verschiebung des Torsos und des Schwerpunktes bedeutet. Daher werden Lösungen gesucht, die einen Kompromiss zwischen Steifigkeit und Dämpfung der Aufprallkraft herstellen. Dabei wird die Anforderung einer durchgängigen Sohle berücksichtigt.

Lösung S1 stellt das Konzept vor, wie es momentan bei Lola verwendet wird. Allerdings ist die aktuelle Sohle von Lola nicht geeignet, um auf Zehen zu stehen. Dies liegt neben der zu schwachen Motorleistung daran, dass regelnde Drehmomente nur gut in eine Richtung übertragen werden. Die Drehachse des Zehengelenks liegt fast über dem hinteren Rand der Zehenpads. Wenn Lola nur auf der Zehe steht und sich der ZMP idealerweise in der Mitte des Zehen-Supportpolygons befindet, entsteht ein Moment im Zehengelenk. [32] legt daher die Zehengelenksachse in die Mitte der Zehensohle. Lösung S1 sieht eine große Zehenfläche vor, um Drehmomente in beide Richtungen zu übertragen und eine größere Kontaktfläche beim Zehenstehen zu haben. Das Dämpfungskonzept bleibt erhalten. Beim Erstkontakt mit der Ferse werden die Aufprallkräfte direkt über den Kraft-Drehmoment-Sensor und nicht über das Zehengelenk übertragen. Das Fersensegment wird zusätzlich mit einem einstellbaren Industriestoßdämpfer mit Endanschlag versehen. Nach dem Initialkontakt komprimiert der Stoßdämpfer bis zum Anschlag und dissipiert Energie. Steht der Fuß dann fest auf dem Boden, werden regelnde Momente ohne Nachgiebigkeit über den Endanschlag übertragen. Die Fersensohle steht durch den benötigten Hub etwas nach unten heraus und vermindert somit die Fußhöhe.

Aus dem Gedanken, die Zehenfläche zu vergrößern ist die Idee entstanden, die Zehenkontakte länger nach hinten zu ziehen. Daher ist Lösung S2 interessant, die die gesamte Sohlenfläche



Bild 3.6: Mögliche Lösungen der Fußdämpfung

mit dem Zehenaktor bewegt, siehe Abbildung 3.6. Steht der Roboter auf der Zehe, wird die gleiche Sohlenfläche benutzt, die beim flachen Aufliegen genutzt wird. Das Supportpolygon ist beim Zehenstehen oder Zehengehen nicht kleiner als sonst und die gesamte Fläche dient durch das Anbringen einer viskoelastischen Schicht zur Dämpfung. Kräfte- und Momenteübertragung über größeren Flächenkontakt verbessern die Steifigkeit gegenüber kleinerem Flächenkontakt [31]. Im Vergleich einer geteilten Sohle werden weniger Bauteile benötigt, die Komplexität sinkt, die Sensormatte bleibt ganz und die Sensorbefestigung ist einfacher. Problematisch ist, dass die hohen Aufprallkräfte nicht direkt über die Ferse in das Fußgelenk übertragen werden, sondern über die Zehenachse laufen. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, ist ein Endstopp angebracht. Kurz vor dem Auftreffen des Fußes steuert der Zehenaktor mit geringem Drehmoment an und presst den Endstopp der Sohle an den Endstopp des Fußgelenks. Dadurch ist sichergestellt, dass die Aufprallkräfte beim Landen direkt an das Fußgelenk übertragen werden. Nachteil ist, dass eine Plantarflexion, also eine Beugung der Zehe in Richtung Boden, über die waagrechte Stellung hinaus nicht mehr möglich ist. Diese Bewegung wurde aber bisher nie benötigt.

Bei Lösung S3 wird ein Industriestoßdämpfer in die angetriebene Zehe integriert. Die Zehensohle selbst ist durch Fest-Los-Lager mit dem Zehengelenk verbunden. Der Zehenaktor treibt einen Hebelarm an, der über einen einstellbaren Stoßdämpfer mit der Sohle verbunden ist. Wie bei Lösung S2 wird der Hebelarm durch den Zehenaktor über den Endstopp an das Zehengelenk gepresst. Bei Initialkontakt wird der Stoßdämpfer bis zum Anschlag komprimiert. Die Kräfte werden über den Endstopp in das Zehengelenk geleitet. Nachteilig ist, dass die Sohle über den Stoßdämpfer angetrieben wird. Wird der Antriebshebel mit hoher Beschleunigung verstellt, kommt es durch die Massenträgheit der Sohle zur Komprimierung des Dämpfers, was zu Schwingungen führt. Daher wird Lösung S3 nicht empfohlen.

Die Rückstellkraft des Industriestoßdämpfers muss bei der Regelung berücksichtigt werden. Es wird vermutet, dass dies ein Grund war, den Stoßdämpfer bei der aktuellen Fußkonstruktion zu entfernen. Um die Rückstellkraft zu vermeiden, wird nach einer Lösung gesucht, die eine Dämpfung ohne Federung ermöglicht. Inspiriert durch die viskose Luftdämpfung von [10] wird zur Energiedissipation bei Lösung S4 eine Luftkammer implementiert. Wie bei Lösung Z3 ist die Sohle über ein Loslager an das Zehengelenk angebracht. Der Zehenaktor treibt einen Hebelarm an. Dieser ist über die Luftkammer mit der Sohlenkonstruktion verbunden. Die Luftkammer ist kompressibel und besitzt eine Öffnung aus der Luft entweicht. Über die Öffnungsweite, wird die Dämpfung eingestellt. In Abbildung 3.6 wird gezeigt, wie die Luftkammer komprimiert wird. Um die Luftkammer wieder zu füllen wird der Hebelarm in der Schwungpahse nach oben bewegt. Gleichzeitig verhindert der Endstopp, dass die Sohle mitgedreht wird. Dadurch muss die Luftkammer expandieren. Allerdings werden bei dieser Lösung die Aufprallkräfte als Drehmomente über den Zehenaktor geleitet. Die MKS-Simulation zeigt, dass die Aufprallkraft bei Fersenerstkontakt ein Drehmoment von $12000N \cdot 0.13m = 1.56$ kN in der Zehe verursacht, welches Motor und Getriebe beschädigen würde. Daher fällt Lösung S4 weg.

Es werden beide Konzepte S1 und S2 umgesetzt. Die zweiteilige Sohle bei Lösung S1 bietet zusätzliche Dämpfung durch den Industriestoßdämpfer und da die bisherige Fersenkonstruktion weiterverwendet wird, ist der Neukonstruktionsaufwand gering. Gegen Lösung S1 spricht, dass der Stoßdämpfer nicht in die Regelung integriert worden ist. Die Reglung besitzt ein vereinfachtes Modell, bei dem die verformbaren Kontaktelemente entweder durch unabhängige Feder-Dämpfer-Elemente oder alternativ mit der Finite Elemente Methode (FEM) modelliert sind [7]. Der Stoßdämpfer wird in Regelung und somit auch in der MKS-Simulation nicht berücksichtigt. Die Neigung des Torsos und die Kontaktkräfte reagieren sehr sensibel auf die Dämpfung und Steifigkeit der Fußkontakte [7]. Dies ist möglicherweise der Grund, warum der Stoßdämpfer aktuell durch eine steife Verbindung ausgetauscht worden ist. Die Regelparamter wurden für ein Gehen ohne Stoßdämpfer optimiert. Werden Stoßdämpfer genutzt, ist es sinnvoll diese auch in der Regelung zu implementieren. Da Lösung S2 keinen Stoßdämpfer besitzt, verringert sich die Anzahl unbekannter Parameter der Regelung in der Simulation und bildet damit die Realität besser ab. Der Fuß wird über die gesamte Sohlenfläche gedämpft, auch wenn Lola auf den Zehen steht. Zusätzlich besteht Potential der aktiven Dämpfung, indem die Zehe ausgelenkt Erstkontakt beim Auftreffen hat und dann durch Absenken des Sprunggelenks die Dauer des Abbremsvorganges verlängert, was zu verminderten Kräften führt, siehe Abbildung 3.7. Nach der Realisierung sind Experimente beider Fußkonzepte nötig, um die Dämpfung je nach Anwendungsfall zu bestimmen. Eine Implementierung eines Modells der Dämpfung in der Regelung ist weiterführend zu empfehlen.



Bild 3.7: Abbremsvorgang

3.4 Bodentopologieerfassung

Die konstruktiven Maßnahmen dafür, die Aufprallkräfte zu minimieren, wurden besprochen. Durch regelungstechnische Maßnahmen kann der Fuß jedoch schon vor Initialkontakt abbremsen und so hohe Aufprallkräfte vermeiden. Dazu benötigt die Regelung Informationen, wie weit die Auftrittfläche unter der Sohle des Schwungbeins entfernt ist. Ist zusätzlich noch der Ort des bevorstehenden Kontakts bekannt, kann diese Information dazu dienen, um dem Hindernis noch während des Schrittes auszuweichen.

Zur Messung des Abstandes werden zwei Prinzipien unterschieden. Die Messung durch physischen Kontakt und die berührungslose Messung. Vier Lösungen zur Abstandsmessung werden in Abbildung 3.8 gezeigt. Lösung B1 zeigt nachgiebige Stifte, deren Auslenkung wie bei der Konstruktion von [24] durch einen Fotosensor gemessen wird. Dies hat den Nachteil, dass der Fuß nur im rechten Winkel zum Boden abgesenkt werden kann, um nicht an Hindernissen hängen zu bleiben. Auch während der Vorwärtsbewegung des Fußes dürfen den Stiften keine Hindernisse in den Weg kommen. Daher müsste die Schritthöhe um die herausragende Länge der Stifte erhöht werden.



Bild 3.8: Mögliche Lösungen der Bodentopologieerfassung

Lösung B2 nutzt ein ähnliches Prinzip, allerdings werden biegsame Antennensensoren verwendet. Bei Kontakt biegen sich diese zurück und erzeugen eine Widerstandsveränderung, die gemessen wird. Die Sensoren können auch während der gesamten Schwingphase auf Hindernisse treffen. Sie biegen sich und weichen so den Hindernissen aus. Ein weiterer Vorteil ist, dass diese nur an der Vorderkante der Zehe angebracht werden, um die gesamte Auftrittfläche zu messen. Wie bei der Abstandmessung mit Ultraschallsensoren von [21] 2.4 werden die Messdaten in eine einfache Repräsentation des Bodenprofils in Echtzeit übersetzt. Aus der Differenz des bekannten theoretischen Abstandes ohne Hindernisse und des realen gemessenen Abstandes wird der aktuelle Abstand von Fußsohle bis Kontaktpunkt errechnet. Aus den Messdaten, die über die gesamte Schwungphase gespeichert werden, wird eine Bodentopologie errechnet. Der geringste Abstand zur errechneten Bodentopologie der Auftrittsfläche wird benutzt, um den Fuß rechtzeitig vor Initialkontakt abzubremsen. Dies hat den Nachteil, dass nur Abstände messbar sind, die kleiner der Fühlerhöhe sind. Zusätzlich könnten die Fühler beim Auftreten beschädigt werden oder an Hindernissen hängenbleiben.

Die berührungslosen Messprinzipien haben diese Nachteile nicht. Lösung B3 verwendet wie bei [21] 2.4 Ultraschallsensoren zur Bodenabstandsmessung. Analog zu Lösung B2 werden die Sensoren nur an der Zehenspitze angebracht und die Messdaten während der Schwingphase in eine

Bodentopologie übersetzt. Bei einem sensortypischen Öffnungswinkel von 50 Grad und einer Anbringungshöhe von 50 mm über der Sohle werden 42 mm Bodenbreite erfasst, siehe Abbildung 3.9. Es werden daher mindestens 6 Sensoren benötigt, um die Fußbreite von 220 mm lückenlos abzudecken. Anders als beim kindgroßen Roboter von [21], bei dem die Ultraschallsensoren am Torso angebracht sind, befestigt sie [47] am Fuß und berichtet über Schwingungen, die die Messungen erschweren. Es wurde eine Recherche zu verschiedenen berührungslosen Messmethoden durchgeführt, um Sensoren zu finden, die durch schräge Oberflächen und Schwingungen weniger beeinflusst werden. Hierbei stellen sich Infrarot-Sensoren von Sharp als interessant heraus, welche Lösung B4 darstellen. Diese sind kostengünstig, weniger anfällig gegen schräge Oberflächen und besitzen Messbereiche von 30 mm bis 1.5 m und Messgenauigkeiten ab 0.4 mm. Der Messfleck beträgt bei 50 mm Entfernung etwa 5 mm Durchmesser im Gegensatz zu den 42 mm bei Ultraschallsensoren. Daher werden mehr Sensoren benötigt, um die Fußbreite abzudecken. Dadurch, dass sich die Messkegel nicht überschneiden und ist die Auflösung quer zur Laufrichtung durch mehr Messpunkte über die Fußbreite genauer. Um zwischen Lösung B3 und B4 zu entscheiden werden in Kapitel 4 Experimente durchgeführt, die die Machbarkeit dieser Messprinzipien zu validieren.



Bild 3.9: Messkegel der Ultraschallsensoren

3.5 Gesamtkonzept

Gesamtkonzept 1 besteht also aus dem vorhandenen Kraft-Drehmoment-Sensor (1), einem aktiven Zehengelenk (2) mit Motor direkt im Gelenk, einer monolithischen Zehenplatte (3) mit dämpfender Sensormatte (4), einer Fersenstützstruktur (5) mit Endstopp (6) und berührungslosen Sensoren (7) an der Zehenvorderkante. Vor Initialkontakt wird die Zehenplatte an den Endstopp gedrückt, um die Kontaktkräfte sicher und direkt in den Kraft-Drehmoment-Sensor zu übertragen.

Bei Gesamtkonzept 2 ist die Sohle in zwei Kontaktelemente (8) unterteilt. Beide besitzen eine dämpfende Sensormatte. Die Ferse rotiert um ein passives Fersengelenk (9). Ein Industriestoßdämpfer (10) mit Endstopp (11) kontrahiert bei Bodenkontakt und dissipiert einen Teil der Aufprallenergie. Durch den Endstopp werden in der Standphase die stabilisierenden Kräfte sicher an den Boden übertragen.

Ein modularer Ansatz beider Gesamtkonzepte erlaubt den Austausch des aktiven Zehengelenks durch ein passives Zehengelenk oder einer steifen Zehenkonstruktion. Kompatibilität zu alten Bodenkontaktelementen wird durch Verwendung von Flanschschnittstellen gewährleistet. Im nächsten Kapitel wird die Konstruktion der beiden Gesamtkonzepte behandelt.



Bild 3.10: Gesamtkonzept 1 und Gesamtkonzept 2

Kapitel 4

Konstruktion und Komponentenauswahl

In diesem Kapitel wird die Konstruktion und die Komponentenauswahl behandelt. Ziel ist es das Designkonzept zu realisieren. Gemäß dem Münchner Vorgehensmodell entspricht das Kapitel dem Schritt Zielerreichung absichern. Die Risiken werden durch Experimente und Tests wie Finite Elemente Methode (FEM) und Kollisionsanalyse vermindert.

Zuerst wird in Abschnitt 4.1 das Vorgehen bei der Konstruktion geklärt und die Konstruktionsrichtlinien erläutert. Wie in den vorherigen Kapiteln werden zur Reduzierung der Komplexität die Subsysteme einzeln behandelt. Die Fußkonstruktion teilt sich in Sprunggelenk mit Kraft-Drehmoment-Sensor (1), Zehenaktor (2), Sohle (3) und Sensorhalter zur Bodentopologieerfassung (4), wie in Abbildung 4.1 zu sehen ist. Der ans Sprunggelenk anschließende Kraft-Drehmoment-Sensor, der den Vorderfuß darstellt, bleibt unverändert und sorgt mit den Flanschverbindungen für geeignete Schnittstellen. In Abschnitt 4.2 wird der Motor für das Zehengelenk ausgelegt, ausgewählt und der Aufbau detailliert betrachtet. In Abschnitt 4.3 wird die Entwicklung der Sohlenplatte behandelt. Zuletzt werden in Abschnitt 4.4 die Sensoren für die Bodentopologieerfassung ausgewählt, getestet und eine Sensorhalterung konstruiert.



Bild 4.1: Aufteilung des Fußes in vier Komponenten

4.1 Vorgehen Konstruktion

Der Konstruktionsprozess umfasst die Entwicklung, Evaluierung und Auswahl diverser Konstruktionsvarianten und die detaillierte geometrische Gestaltung aller mechanischer Bauteile. Dabei wird stets auf Konsistenz mit der Ausgangskonstruktion geachtet. So werden beispielsweise Einschränkungen des Arbeitsraums und Schnittstellenverträglichkeit beachtet. Nachfolgend werden Stücklisten und Konstruktionszeichnungen für die lehrstuhleigene Werkstatt abgeleitet.

Die Konstruktion erfolgt mit dem CAD-Werkzeug CATIA V5 von *Dassault Systemes*. Als Ausgangspunkt wurde die Fußkonstruktion von Lola benutzt [31]. Die Organisation der Baukomponenten und der Modellierungsstil der Richtlinie VDI 2209 [43] wurde übernommen, um die Konsistenz zu wahren. Jede Unterbaugruppen des CAD-Models repräsentiert ein Glied der MKS. Sie beinhalten jeweils ein Skelettmodel, welches keine Geometrien besitzt, aber den Bezugsrahmen der Simulationsdaten abbildet. Dieser Ansatz stellt die Konsistenz des CAD und des Simulationsmodells sicher und vereinfacht die Änderung von neuen Trägheitseigenschaften oder Abmaßen [31]. Mithilfe der CATIA eigenen Finite Elemente Methode (FEM) werden die Bauteile einer Spannungsund Deformationsanalyse unterzogen, sowie auf Dauerfestigkeit untersucht (Anhang A.2.3). Anhand der Ergebnisse werden die Schwachstellen ermittelt und die Bauteile iterativ verbessert. Dadurch werden die Risiken gemäß des Schrittes Zielerreichung absichern vermindert.

Konstruktionsrichtlinien

Allgemeine Konstruktionsregeln, wie fertigungsgerechte Gestaltung und einfache Montage werden vorausgesetzt. Im Folgenden werden Konstruktionsregeln vorgestellt, welche besonderen Einfluss auf die Gestaltung haben, damit niedrige Trägheitsmomente und hohe Steifigkeit erreicht werden. Die Richtlinien wurden aus verschiedenen Quellen zusammengetragen [12, 31, 34, 42].

- Direkte Lastübertragung und -verteilung auf Hauptstruktur Vermeidung von Umleitung des Kraftflusses; Große Einleitungsflächen für Lasten; Optimierte Unterstützung für Bereiche großer Lastübertragung; Einbringung von Sicken bei größeren Flächen; Symmetrische Gestaltung; Geschlossene und gewölbte Querschnitte bevorzugen; Dünnwandige Konstruktion mit Rippen unterstützen; Anisotrope Steifigkeit anstreben, wenn es der Lastfall erlaubt.
- Belastungsspitzen vermeiden Bereiche großer Belastung verstärken; Weiche Querschittsübergänge anstreben.
- Integralbauweise Anzahl der Teile und Verbindungen reduzieren.
- **Fertigungstechnologie für Leichtbauweise** Geringe Stückzahl und Fertigung in eigener Werkstatt erlauben aufwändige Frästeile, die das Gewicht reduzieren; Für fertigungsgerechte Gestaltung Rücksicht auf die der lehrstuhleigenen Werkstatt zur Verfügung stehenden Maschinen nehmen (3+2-Achs-CNC-Fräse DMU50, kleinere Fräsen, Drehbänke).
- **Flanschverbindungen** Nietverbindungen bei unlösbaren Bauteilen bevorzugen; Direkten Kraftfluss bei Flanschteilen anstreben; Viele kleine Schrauben gegenüber weniger großer Schrauben bevorzugen; Längsbelastung gegenüber Querbelastung der Schraubverbindungen bevorzugen; Reibwertverbessernde Scheiben auch bei kleinem Flansch für Lastübertragung nutzen; Formschlüssige Verbindung für weniger Schrauben und höhere Gelenksteifigkeit.
- **Gelenkverbindungen** Gelenkverbindungen tragen zum Großteil der Deformation bei und sind daher steif und spielfrei auszulegen; Dünne Lager mit größerem Durchmesser bei gleicher Tragfähigkeit werden bevorzugt.
- **Dämpfung** Da Dämpfung und Steifigkeit konträre Bedingungen sind, werden die Erfahrungswerte und experimentelle Ermittlung des aktuellen Fußes als Ausgangspunkt verwendet. Weitere Verbesserungen durch Experimente sind mit dem einstellbaren Dämpfungsmecha-

nismus der Ferse und einfach austauschbaren Dämpfungsmaterialien möglich.

Modularität Da es sich um ein Forschungsprojekt handelt, bei dem die zukünftigen Bewegungsaufgaben, Experimente und Erweiterungen unklar sind, ist ein modulares Design sinnvoll. Die Module sind einfach austauschbar und die Verbindungen lösbar auszulegen. Zusätzliche Schnittstellen, beispielsweise für Sensorhalterungen, werden vorgesehen.

4.2 Zehenaktor

In Kapitel 3 wurde ein Konzept erarbeitet, bei dem der Zehenaktor direkt im Zehengelenk sitzt. In den folgenden Abschnitten wird für dieses Konzept ein passender Motor ausgelegt. Zunächst wird die Motorenvorauswahl erläutert. Nachfolgend wird beschrieben, wie die Motoren aufgrund von simulierten Lastprofilen dimensioniert werden. Dabei wird iterativ vorgegangen und basierend auf den verfügbaren Daten eine Motorwahl getroffen. Mit den neuen Daten wird die Auslegung nochmals durchlaufen. Beispielsweise wird zunächst mit der Position der bisherigen Zehengelenksachse und dem Gewicht des bisherigen Motors gerechnet. Nach der Auslegung werden Gewicht und Positionsveränderung aufgrund größerer Bauraumgröße angepasst und erneut durchgerechnet.

4.2.1 Motorvorauswahl

[31] hat in seiner Arbeit Motoren verglichen und eine Vorauswahl getroffen. Für die Auswahl der Motoren wurden die Auswahlkriterien nach [27] auf folgende drei reduziert:

- Leistungsdichte
- Beschleunigungskapazität
- Effizienz und allgemeine Leistungsfähigkeit

Die Leistungsdichte wird aufgrund des Verhältnisses zwischen Drehmoment und Gewicht bestimmt. Die Höhe des Drehmoments in Bezug zum Trägheitsmoment des Motors repräsentiert die Beschleunigungsleistung. Als Indikator für die Effizienz und allgemeine Leistungsfähigkeit dient der Kennwert K_m , der das Verhältnis von Drehmoment τ_p zur Wurzel der ohmschen Verlustleistung P_s beschreibt (Gleichung 4.1). Der Wert beschreibt, welches Drehmoment erzeugt wird, wenn der Motor der Motor gesperrt wird und folglich die gesamte Eingangsleistung der Verlustleistung entspricht. Daher ist K_m ein geeigneter Indikator, um die Effizienz und die Gesamtleistung der Permanentmagnetmotoren zu vergleichen. K_m ist bis auf das Material des Drahtes von der Wickelung unabhängig.

$$K_m = \frac{\tau_p}{\sqrt{P_s}} \tag{4.1}$$

Gehäuselose Motorenkits, bei denen das Gehäuse eigens konstruiert wird, haben signifikant höheres Leistungs-Gewicht-Verhältnis und Beschleunigungsleistung als einbaufertige Motoren. Permanentmagnetsynchronmotoren (PMSM) sind den bürstenlosen Gleichstrommotoren in Bezug auf Drehmoment zu Gewicht und Trägheitsmoment überlegen. Die PMSM Motoren von *Parker Bayside* [33] bieten das beste dynamische Leistungsvermögen, und die beste Leistungsdichte bei einer großen Palette an Auswahlmöglichkeiten für Windungen. Zusätzlich sind durch den Einsatz im Roboter Lola Erfahrungswerte, besonders in Bezug auf das thermische Leistungsvermögen, nützlich.

4.2.2 Dimensionierung des Motors

Um die Motoren auszulegen, die den Anforderungen des Lastprofils genügen, werden folgende Kriterien verwendet.

- Das Stillstandsmoment des Motors muss größer oder gleich dem durchschnittlichen effektiven Lastdrehmoment sein, um Überhitzung zu vermeiden.
- Das Spitzendrehmoment des Motors muss über dem maximal benötigten Lastdrehmoment liegen, um der Demagnetisierung des Motors vorzubeugen.
- Die maximale Winkelgeschwindigkeit des Bewegungsprofils des Roboters muss durch die Spitzendrehzahl des Motors erreicht werden.

Um den durchschnittlichen effektiven Lastmoment zu bestimmen, wird zunächst Formel 4.2 aufgestellt, die den aufzubringenden Drehmoment τ_m abbildet, um dem Lastprofil zu folgen.

$$\tau_m = (J_m + J_h) \cdot n \cdot \dot{\omega}_l + \frac{\tau_l}{n} + \tau_{f,m} \operatorname{sgn}(\dot{\omega}_l) + \frac{\tau_{f,l}}{n} \operatorname{sgn}(\dot{\omega}_l)$$
(4.2)

Dabei entspricht der erste Teil der Gleichung dem Drehmoment, das aus der Beschleunigung des Motorschafts und des Harmonic Drive Getriebes entsteht. Das Trägheitsmoment des Motors J_m und des Getriebes J_h werden mit der Winkelbeschleunigung \dot{w}_m multipliziert, die über die Winkelbeschleunigung des Lastprofils und dem Übersetzungsverhältnis n berechnet wird, $\dot{w}_m = \dot{w}_l \cdot n$. Der zweite Term berechnet sich aus dem Lastmoment τ_l , welches am Getriebeausgang angreift und daher durch n geteilt wird. Der restliche Teil der Gleichung repräsentiert die Reibungsverluste, die durch Reibung am Motor $\tau_{f,m}$ und am Getriebe $\tau_{f,h}$ auftreten. Dabei bestimmt sgndie Vorzeichen der Terme. Da die Reibung schwer zu ermitteln ist und hauptsächlich im Getriebe auftritt, wird sie durch den Wirkungsgrad des Harmonic Drive Getriebes nach der Formel $\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$ ersetzt.

$$\tau_m = (J_m + J_h) \cdot n \cdot \dot{w}_l + \frac{\tau_l}{\eta_h \cdot n}$$
(4.3)

Für den Vergleich mit dem Stillstandsmoment τ_{st} wird das quadratische Mittel von τ_m gebildet, wobei der Sicherheitsfaktor f_s mit eingerechnet wird (Formel 4.4). Der Sicherheitsfaktor f_s ist nötig, um unvorhergesehene Belastungen wie Stoße von außen oder abweichende Bewegungsmuster zu bewältigen. Dieser bewegt sich in einem Bereich von 1.5 und 2 bei Lolas Auslegungen von [31]. Der Faktor 1.5 wird gewählt, da die Kapazität des Zehenaktors laut [31] gering ausgelegt werden soll, um das kritische Gewicht des Fußes so niedrig wie möglich zu halten.

$$\tau_{m,\emptyset} = f_s \sqrt{\frac{1}{T} \int_T \tau_m^2 dt} \le \tau_{st}$$
(4.4)

Das Spitzendrehmoment ω_{sp} des Motors muss das maximale Drehmoment des Lastprofils τ_{max} übersteigen (Formel 4.5). Auch hierbei wird der Sicherheitsfaktor f_s mit einbezogen.

$$\tau_{max} = f_s \max[\tau_m] \le \tau_{sp} \tag{4.5}$$

Die maximale Winkelgeschwindigkeit ω_{max} des Lastprofils inklusive des Geschwindigkeitssicherheitsfaktors f_s muss durch den Motor erreicht werden (Formel 4.6).

$$\omega_{max} = f_s max |N \cdot w_l| \le \omega_{sp} \tag{4.6}$$

Genügt ein Motor diesen Anforderungen, wird der Kennwert K_m herangezogen, der die Effizienz des Motors wiederspiegelt. Gleichzeitig wird auf geringes Gewicht und geringe Baugröße geachtet. Die dann ausgewählten Motoren werden in einem zweiten Schritt auf deren thermisches Leistungsvermögen hin untersucht.

Bevor die Berechnungen durchgeführt werden, muss noch geklärt werden, welches Lastprofil dazu verwendet wird. Dabei wird jeweils das Lastprofil zur Berechnung benutzt, welches Maximalwerte bei $\tau_{m,\emptyset}$, τ_{max} und ω_{max} liefert. Diese Lastprofile zu erstellen ist eine Herausforderung, da neben den bereits erstellten Bewegungsmustern von Lola neue Bewegungen hinzukommen.

Lastprofile analysieren

Folgende Lastprofile werden auf Extremwerte getestet.

- Treppensteigen mit maximaler Beugung der Zehe mit Single-Support-Phase und Schrittdauer von 0.8 s
- Unvorhergesehen in ein Loch mit 3 cm Tiefe auf die Zehe fallen.
- Unvorhergesehen mit der Zehe auf einen 3 cm hohen Gegenstand auftreffen.
- Gehen mit maximaler Geschwindigkeit von 5.5 $\frac{km}{h}$.

Es wird schnell klar, dass das Treppensteigen mit gestreckter Zehe einen Extremfall für den Zehenaktor darstellt. Single-Support-Phase bedeutet, dass der gesamte Körper über ein Zehengelenk angehoben wird. Der andere Fuß ist während des Anhebens in der Schwungphase, also in der Luft. Während des Steigens wird der Körper nach oben beschleunigt und abgebremst. Da es für dieses Bewegungsmuster keine Trajektorie und somit keine Simulationsdaten gibt, wurde in Matlab eine vereinfachte Trajektorie erstellt und Geschwindigkeiten und Drehmomente berechnet. Dabei wird vereinfacht davon ausgegangen, dass der Roboter ab dem Fußgelenk aufwärts eine steife Masse darstellt, siehe Abbildung 4.2. Das Zehengelenk ist fest mit dem Boden verbunden und hebt die Masse über den Vorderfuß als Hebel an.

Der Zehenaktor hebt den Roboter innerhalb der Standartschrittdauer von 0.8 s an, siehe Abbildung 4.3. Dabei wird der, aus der Simulation erhaltene maximale Winkel $\alpha_{max} = 52.3^{\circ}$, überschritten. Der Fußhebel führt eine Bewegung aus, bei der über die Hälfte der Dauer konstant beschleunigt und dann die restliche Zeit konstant abgebremst wird. Die konstante Beschleunigung berechnet sich durch $\dot{\omega}_l = \frac{\alpha_{max}}{t^2}$. Nach der Hälfte der Schrittdauer wird somit die maximale Geschwindigkeit $\omega_{max}(0.4s) = \dot{\omega}_l \cdot t = 2.14 \frac{rad}{s}$ erreicht. Das Lastmoment setzt sich aus der



Bild 4.2: Modell des Zehenhebels und dem Roboterkörper als Masse. Die resultierenden Kräfte aus Erdbeschleunigung und Winkelbeschleunigung sind orange gekennzeichnet



Bild 4.3: Weg-, Geschwindigkeits- und Momentverlauf

Erdbeschleunigung, die vertikal nach unten wirkt, und der Beschleunigung $\dot{\omega}_l$, die in Tangentialrichtung wirkt, zusammen. Mithilfe der Formel $\tau = F \cdot r = m \cdot \dot{\omega}_l \cdot r$ leitet sich Gleichung 4.7 ab.

$$\tau_1 = m \cdot g \cdot r \cdot \cos(\alpha) + m \cdot \dot{\omega}_1 \cdot r^2 \tag{4.7}$$

Eingesetzt in Gleichung 4.3 resultiert der Momentenverlauf für das Anheben des Roboters, siehe Abbildung 4.3. Nach 0.8 s wird τ_l nahezu Null, da die Schwungphase des Fußes beginnt und die Masse des Roboters nicht mehr getragen oder beschleunigt werden muss. τ_{max} liegt bei 1.8 Nm und das quadratische Mittel $\tau_{m,\emptyset}$ nach Gleichung 4.4 bei 0.97 Nm. Dabei wird vorerst eine Übersetzung von n = 100 angenommen, wie bei allen Harmonic Drive Getrieben die zu diesem Zeitpunkt in Lola verbaut sind. Gemäß dem iterativen Vorgehen wird je nach Bedarf das Übersetzungsverhältnis abgeändert und die Berechnungen erneut durchgeführt.

Wie in Abschnitt 3.2 angekündigt, soll untersucht werden, wie sich die Unterstützung einer Drehfeder auf den Momentenverlauf auswirkt. Durch den Federmoment τ_d , die der Gewichtskraft entgegenwirkt, wird der Momentverlauf, wie in Gleichung 4.8 zu sehen ist beeinflusst. Dabei berechnet sich das Federmoment τ_d mit der Federkonstante *c* durch $\tau_d = \alpha \cdot c$. Durch diese einfache Maßnahme wird $\tau_{max} = 0.91$ Nm und $\tau_{m,\emptyset} = 0.69$ Nm. Dies stellt eine Reduzierung um 49.4% und 38.9% respektive dar. Der Momentenverlauf wird in Abbildung 4.4 dargestellt.

$$\tau_m = (J_m + J_h) \cdot N \cdot \dot{w}_l + \frac{\tau_l - \tau_d}{\eta_h \cdot N}$$
(4.8)

Interessant ist auch zu untersuchen, ob ein progressiver oder degressiver Drehmomentverlauf der Drehfeder oder eine Druckfeder den Zehenaktor besser unterstützen. Da die Federn den Lastmomentenverlauf nur in der Hinsicht verändern, dass bis 0.8 s der Federmomentverlauf abgezogen wird und ab 0.8 s bis 1.6 s in der Schwungphase der Motor diesem Federmomentverlauf entgegenwirken muss, ändert sich an dem aufzubringenden Durchschnittsdrehmoment $\tau_{mean} = 64.1$ Nm



Bild 4.4: Momentenverlauf ohne und mit Drehfeder und der Feder-Drehmomentverlauf der gesamten Bewegung inklusive Schwungphase

nichts. Da das quadratische Mittel der Gleichung (4.4) den höheren Wert stärker bewertet, liegt der Wert $\tau_{m,\emptyset}$ immer über dem arithmetischen Mittel τ_{mean} . Das bedeutet, unabhängig welcher Federverlauf gewählt wird, $\tau_{m,avg}$ kann maximal auf $\tau_{mean} = 64.1$ Nm reduziert werden. Daher bleibt der Unterschied zwischen Drehfeder, Druckfeder oder Zugfeder gering. Entscheidender für die Auswahl ist, welche Federn sich besser in die Konstruktion einfügen und leichter montieren und demontieren lassen.

Bezogen auf das maximale Drehmoment gibt es zwei weitere Extremfälle, die untersucht werden. Zum einen das unvorhergesehene *Fallen* in ein Loch der Tiefe 3cm auf die Zehenspitze und das unvorhergesehene Auftreffen mit der Zehenspitze auf einen 3cm hohen Gegenstand. Beide Fälle werden mithilfe der MKS-Simulation überprüft. Die beiden Fälle werden simuliert indem Lola Hindernisse in den Weg gestellt bekommt, siehe Abbildung 4.5). Aus den Aufprallkräften, die auf die Zehenspitzen wirken kann über die Gleichung $\tau = F \cdot r$ das resultierende Aufprall-Drehmoment berechnet werden. In beiden Fällen liegt das maximale Aufprall-Drehmoment beim *Fallen in Loch* und *Auftreffen auf Hindernis* mit $\tau_{max1} = 0.51$ Nm und $\tau_{max2} = 0.59$ Nm respektive unter dem maximalen Drehmoment das beim Treppensteigen auftritt.

Ein Extremfall, der für ω_{max} maßgeblich ist, ist das schnelle Gehen. Auch dieses wird mithilfe der MKS ausgelesen. Beim schnellen Gehen (5.5 $\frac{km}{h}$) sind Winkelgeschwindigkeiten von 8.2 $\frac{rad}{s}$ nötig. Dieser Wert übersteigt die Anforderungen des Treppensteigens bei weitem und dient somit als maximal benötigte Winkelgeschwindigkeit $\omega_{l,max}$.

Nachdem die drehmomentbedingten Maximalwerte feststehen, wird die Motorauswahl auf die Motoren begrenzt, welche zusätzlich einen hohen K_m aufweisen. Weitere Motoren werden aussortiert, da sie ein vergleichbar zu großes Gewicht besitzen oder zu großen Bauraum aufweisen. Bei den Motoren die übrigbleiben, sind die thermischen Leistungseigenschaften und ω_{max} zu untersuchen.



Bild 4.5: Links: Fallen in ein Loch. Rechts: Auftreffen auf Hinderniss

Thermische Analyse

Mit Gleichung 4.9, wird überprüft, ob der Motor auf Dauer überhitzt. Dabei muss die Dissipationsleistung $P_{m,\emptyset}$ des Motors kleiner als die maximal abgeführte Leistung $P_{m,max}$ sein.

$$P_{m,\emptyset} = \frac{R}{K_{\tau}^2} \tau_{m,\emptyset} \qquad P_{m,\emptyset} \le P_{m,max}$$
(4.9)

Über die thermische Abgabeleistung $P_{m,max}$ mit (4.10) wird berechnet, wieviel Leistung an die Umgebung abgeführt wird, ohne den Motor über die zulässigen $\theta_{m,max} = 155$ °C zu erwärmen. Die Konstante R_{th} beschreibt den thermischen Widerstand. Der Wärmewiderstandswert aus dem Datenblatt des Herstellers ist ungenau, da die Geometrien um den Motor die Wärme ableiten und den Wert somit beeinflussen.

$$P_{m,max} = \frac{\theta_{m,max} - \theta_{\infty}}{R_{th,m}}$$
(4.10)

Es wurde ein Experiment durchgeführt, um R_{th} zu bestimmen. Mit der Messung der Umgebungstemperatur, der Motor-Innenraum-Temperatur und der Leistung des Motors ($P = U \cdot I$), wird mit Formel (4.10) R_{th} bestimmt. Für das Experiment wurde der Schultermotor genutzt, der die voraussichtliche Motorgehäusegröße und ähnliche Einbausituation besitzt und daher eine gute Näherung von R_{th} des Zehenmotors verspricht. Lola sollte vorher mindestens 30 Minuten betrieben werden, da Versuche mit Johnnie gezeigt haben, dass die Motoren erst nach 20 bis 30 Minuten den stationären thermischen Zustand erreichen [30, 31]. Lola wurde bei dem Versuch aufgehängt, da Lola im Labor aus Platzgründen nicht so weit laufen kann. Allerdings musste der Versuch nach 15 Minuten abgebrochen werden, da das Schmierfett der Beinmotoren zu heiß wurde und austrat. Mit einem Multimeter wurde der Widerstand, des im Motor verbauten Widerstandthermometers abgelesen und in die Temperatur umgerechnet. In diesem Versuch war der Temperatur Unterschied 5.8 Grad, was nach 4.10 $R_{th} = 0.25 \frac{K}{W}$ ergibt. Es wird davon ausgegangen, dass die stationäre Temperatur noch nicht erreicht war und somit $R_{th} \frac{K}{W}$ höher ist. Daher wird bei der Auswahl der Motoren mit Gleichung (4.9) der Wärmewiderstandswert aus dem Datenblatt des Herstellers genutzt. Ein Versuchsaufbau, bei dem der Motor isoliert in ähnlicher Einbausituation betrieben wird, ist zu empfehlen. Wegen dem hohen Zeitaufwand war dieser Versuch in diesem Rahmen jedoch nicht möglich.

Eine weitere Analysemöglichkeit bietet der Vergleich der Drehzahl-Drehmoment-Kurven der ausgewählten Motoren mit dem Lastprofil, siehe Abbildung 4.6. Die Drehzahl-Drehmoment-Kurve wird über die Geschwindigkeitsgrenze 4.11 und die thermische Grenze 4.13 definiert. Gleichung 4.13 entsteht aus 4.12, welche die magnetischen Verluste durch Wirbelströme und Hystereseverluste über die Motorgeschwindigkeit beschreibt. Neben den magnetischen Verlusten sorgen elektrische Verluste für Energiedissipation. Diese werden durch die Formel $P_e = R \cdot I^2$ berücksichtigt. Gleichung 4.13 zeigt also die zulässige Winkelgeschwindigkeit ω_m bei der die magnetischen und elektrischen Verluste über die thermische Energieabgabe ausgeglichen werden.

Liegt das Lastprofil unter der Kurve tritt keine Überhitzung des Motors ein und $\omega_{l,max}$ wird erreicht. Kurzzeitig darf das Lastprofil die thermische Grenze überschreiten, da der Motor dazwischen wieder abkühlt. Zur Überprüfung, dass der Motor auf Dauer nicht überhitzt, wird wieder Gleichung (4.9) genutzt.

$$\omega_m = \frac{U}{K_\tau^2} - \frac{R}{K_\tau^2} \tau_m \tag{4.11}$$

$$P_c = P_{c0} \omega_m^{\frac{3}{2}}$$
(4.12)

$$\omega_m = \left[\frac{1}{P_{c0}} \left(P_{m,max} - R \cdot I^2\right)\right]^{\frac{2}{3}} = \left[\frac{1}{P_{c0}} \left(P_{m,max} - \frac{R}{K_{\tau}^2} \tau_m^2\right)\right]^{\frac{2}{3}}$$
(4.13)

Mithilfe des Diagramms werden die Geschwindigkeitsanforderungen überprüft. Ein Extremfall, der für ω_{max} maßgeblich ist, ist das schnelle Gehen. Auch dieses Lastprofil wird mithilfe der MKS ausgelesen und mit den Motorkennlinien verglichen. Mit maximal 8.2 $\cdot 100^{\text{rad}/\text{s}} \equiv 7800 \text{ U/min}$ liegt dieser Extremfall unter der Drehzahlgrenze.

Bei der Auswahl der passenden Getriebe werden Geschwindigkeits- und Drehmomentanforderungen beachtet. Höhere oder niedrigere Übersetzungsverhältnisse als n = 100 bieten keinen Vorteil. ω_{max} wird durch das Getriebe Harmonic Drive *HFUC-20100* [15] mit einer Drehzahlgrenze von 10000 U/min $\equiv n \cdot \omega_{max} = 100 \cdot 10.47 \text{ rad/s}$ nicht eingeschränkt. Auch das Bruchmoment (147 Nm) schränkt τ_{max} nicht ein. Da auch das Getriebe durch Reibungskräfte eine weitere Wärmequelle darstellt, wird die thermische Berechnung (4.10) komplexer. Da der ausgewählte Motor mit demselben Getriebe bereits in der Schulter von Lola eingebaut ist, und die Temperatur nie annähernd $\theta_{m,max} = 155$ °C erreichte und Lola nicht dauerhaft betrieben wird und daher immer wieder abkühlen kann wird davon ausgegangen, dass die ausgewählte Zehenmotor-Getriebe-Kombination nicht überhitzt.



Bild 4.6: Motorkennlinien für einige in Lola bereits eingebauten Motoren und den ausgewählten Motor K064050-9D. Das Lastprofil zeigt das Treppensteigen mit Singelsupport inklusive Sicherheitsfaktor



4.2.3 Konstruktion des Zehenaktors

Bild 4.7: Aufbau des Zehenaktors

In Abbildung 4.7 wird der Motoraufbau dargestellt. Der prinzipielle Motoraufbau von [31] bleibt unverändert. Daher wird der Aufbau nur kurz besprochen und anschließend auf Unterschiede detaillierter eingegangen. Für optimale Wärmeableitung ist der Stator (1) des K064050 mit wärmeleitendem Kleber mit dem Gehäuse (2) verbunden. Kühlrippen unterstützen die Konvektion. Die Motorwelle (3) mit dem Permanentmagnet-Rotor (4) ist über Rillenkugellager (5) in einer Fest-Loslager-Anordnung statisch bestimmt. Die Motorwelle ist auf geringes Trägheitsmoment optimiert. Das Festlager ist nahe dem Magnetring des Inkrementalenkoders (6), da die festgelegte Position Interpolationsfehler reduziert und optimale Messergebnisse sicherstellt. Der Inkrementalenkoder misst Geschwindigkeit und Winkelposition des Rotors. Der angeflanschte Wellengenerator (7) des Harmonic Drive Getriebes überträgt den Drehmoment über den Flexspine (8) an den Ausgangsflansch (9). Sichere Drehmomentübertragung wird über eine, hier nicht dargestellte, Reibscheibe *EKagrip* [13] ziwschen Flexspine und Ausgangsflansch sichergestellt. Die beiden Radialkugellager (10) bilden die Fest-Loslager-Anordnung des Zehenaktors gegenüber dem Vorderfuß. Beide sind dünnwandige versiegelte Lager, die in der Robotik aufgrund der kleinen Querschnitte und der geringen Masse verwendet werden. Eine dünne Sensorwelle (11) verbindet Ausgangsflansch mit dem Absolutwinkelsensors (12) sowie dem Endschalter (13). Der Endschalter, der den Bewegungsraum der Zehe limitiert, wird durch einen photoelektrischen Sensor und eine Nockenscheibe realisiert (hier vereinfacht dargestellt). Die Sensorwelle besitzt eine Kerbe (14), die als Festkörpergelenk wirkt. Zusammen mit der spielfreien Elastomerkupplung (15) gleicht sie radiale und axiale Fehlstellungen aus. Durch das zweireihige Schrägkugellagers (16) ist die Konfiguration statisch bestimmt und die axiale Position der Messscheibe des Absolut-Winkelsensors (12) festgelegt. Abdeckungen (17) und Kabeldurchführungen (18) schützen die Sensoren vor Umwelteinflüssen. Alle Lager sind abgedichtet und Spaltdichtungen (19) schützen Motor- und Sensorraum vor Eintritt der Fettschmierung.

Ein Unterschied zur Ausgangskonstruktion ist die Drehfederuntertützung. Um den Motor optimal zu unterstützen wurde eine Drehfeder gewählt (Gutekunst *T-18411R, Anhang A.3.4* [14]), deren Federkonstante möglichst dem Parameter des Matlab-Modells entspricht. Um die Höhe des Unterstützungsdrehmoments im unausgelenkten Zustand der Zehe einzustellen, sollte der Winkel zwischen den beiden Schenkeln der Feder beliebig wählbar sein. Über die bogenförmigen Nuten des Schenkelhalters (1) werden Winkel in einem Intervall von 12° erlaubt, siehe Abbildung 4.8. Zusammen mit zusätzlichen Bohrungen (2) werden beliebige Winkel bis 45° möglich. Der an-

dere Schenkel liegt am Kopf einer Maschinenschraube (3) auf, die durch die Abstandshülse (4) hervorragt. Je nachdem, wo die Abstandshülse sitzt, werden acht verschiedene Winkelstellungen erlaubt. Durch die Kombination der stufenlosen Verstellung und den acht Winkelstellungen sind beliebige Winkel einstellbar. Über eine, nicht dargestellte, EKagrip Reibschicht zwischen Klemmring und Schenkelhalter werden Drehmomente bis 111 Nm sicher übertragen, siehe Anhang A.2.2. Die Drehfeder sitzt auf dem Dorn (5) der angeflanschten Hebelstruktur. Durch die modulare Konfiguration wird das Experimentieren mit verschiedenen Federn und Winkelstellungen erleichtert.



Bild 4.8: Aufbau des Federmechanismus

4.3 Sohle

4.3.1 Zweigeteile Sohle

Bei der zweigeteilten Sohle sind im Vergleich zur Ausgangskonstruktion von [31] nur Änderungskonstruktionen für die Kontaktelemente nötig. Der Dämpfungsmechanismus des Fersensegments bleibt gleich. Das passive Fersensegment (1) besitzt einen hydraulischen Industriestoßdämpfer (2), der bei Belastung der Ferse komprimiert wird, siehe Abbildung 4.9. Dadurch wird die Dauer, in der der Fuß abgebremst und Energie dissipiert wird, erhöht. Ist der Stoßdämpfer kontrahiert stellt der mechanische Endstopp (3) die Übertragung der stabilisierenden Kräfte sicher. Zusätzliche Dämpfung und Anpassung an kleine Unebenheiten bieten die viskoeastischen Schichten. Die Schichten (4) und (5) bestehen aus Sylomer mit unterschiedlichen Dämpfungseigenschaften. Schicht (4) wird in der Initialphase beansprucht. Aufgrund der kleinen Kontaktfläche und der hohen Aufprallkraft ist die spezifische Belastung sehr hoch. Daher wird ein hohes Elastizitätsmodul gewählt. Schicht (5) besitzt ein niedriges Elastizitätsmodul, da die Belastung auf die komplette Fußfläche wirkt. Die Kurve der Rundungen ist eine Klothoide (7). Bei einer Klothoide ist die Krümmung proportional zu ihrer Länge. Dies verhindert beim Abrollen Sprünge im Kraftverlauf. Neu ist die Sensormatte (8), die Position und Druck des Bodens auf die Sohle misst. Diese wird auf der Dämpfungsschicht angeklebt. Zusätzlich wird sie um die abgerundeten Kanten der Sohlenbasisstruktur gestülpt und durch die Klemmplatten (9) eingespannt. Dies bietet Halt gegen die, für Klebverbindungen anfällige, Schälbeanspruchung. Es besteht die Option auf die dämpfenden Schichten (4) und (5) zu verzichten, da die Sensormatte auch Dämpfungseigenschaften besitzt. Experimente mit der fertigen Konstruktion werden zeigen, welche Dämpfung benötigt wird.



Bild 4.9: Aufbau der zweigeteilten Sohle

4.3.2 Monolithische Sohle

Das Konstruktionsvorgehen der einteiligen Sohle unterscheidet sich von dem der anderen Bauteile. Die Sohlenstruktur muss hohen Biegebeanspruchungen standhalten und sich möglichst wenig deformieren, da eine kleine Deformation im Fuß zu großen Positionsänderungen des Torsos führt. Ein solch großes Bauteil das hohe Stabilität benötigt, bietet Potential Gewicht zu sparen, da Masse am Fuß, wegen der hohen Dynamik besonders kritisch ist. Daher wird folgendes Vorgehen zur bionischen Optimierung mit dem Werkzeug solidThinking Inspire angewendet. Die Funktionsflächen (1) und der zur Verfügung stehende Designraum werden festgelegt (2), siehe Abbildung 4.10 (a). Anschließend werden die Lagerbedingungen (3) festgelegt und die Lastfälle (4) definiert. Als Lastfälle werden die extremsten Situationen benutzt. Beispielsweise, wenn der ZMP auf am hintersten Rand der Ferse liegt und somit einen hohen Biegemoment verursacht. Fertigungstechnische Randbedingungen wie die Auszugsrichtung werden festgelegt. Anschließend berechnet das Programm eine bionisch optimierte Lösung, bei der an Stellen hoher Belastung Material angereichert wird, ähnlich dem Wachstum eines Knochens. Das Resultat dient als Inspiration. Weitere Inspiration aus der Bionik brachte eine Recherche zu biegesteifen Plattenstrukturen. Die Bienenwabenstrukturen weisen eine hohe Biegesteifigkeit in Relation zur Masse auf [3]. Eine weit höhere Stabilität erreichen Bienenwabenstrukturen in Sandwichbauweise, die in der Leichtbauindustrie verwendet werden. Diese sind aber nicht fräsbar und widersprechen damit der Integralbauweise. Das weitere Konstruktionsvorgehen folgt dem der anderen Bauteile. Mittels Spannungs- (c) und Verformungsanalyse (d) der Finite Elemente Methode von CATIA werden die Bauteile untersucht und iterativ verbessert, siehe Abbildung 4.10.

Die monolithische Sohle besitzt keine gedämpfte Fersenstruktur. Die Sohle (1) wird mit Schraubverbindungen (2) an das Zehensegment (3) angeflanscht, siehe Abbildung 4.11. Eine Passfeder legt die Lage fest. Bei Initialkontakt liegt das Sohlensegment auf den Stützstrukturen (4) auf, die an den Kraft-Drehmoment-Sensor angeflanscht sind. Dies sorgt dafür, dass sich die hohen Aufprallkräfte aufteilen und verhindert große Drehmomente im Zehengelenk, die den Motor demagnetisieren. Vor Aufprall wird die Sohle mit geringem Drehmoment auf die Stützstruktur gedrückt um den Kontakt sicherzustellen. Eine dünne Schicht aus Sylomer (5) sorgt für Dämp-



Bild 4.10: Darstellung des Konstruktionsvorgehens der monolithischen Sohle

fung und vermindert Schwingungen. Für einige Laufexperimente ist es sinnvoll die Bewegung des Zehengelenks zu sperren. In diesem Fall kann die Sylomerschicht durch eine Passscheibe ersetzt werden und die Sohle mit einer Schraubverbindung (6) an den Stützstrukturen gesichert werden. Die Dämpfungsschichtunter der Sohle, sowie die Befestigung der Sensormatte folgt dem gleichen Prinzip wie bei der zweiteiligen Sohle.

Um die optimale Auflageposition der Sohlenstruktur auf den Stützstrukturen zu finden, bei der die Durchbiegung der Sohle möglichst gering ist, wurde ein einfaches Balkenmodell benutzt 4.12. Die beiden Lastfälle die Extremwerte der Durchbiegung darstellen sind das *Auftreten auf hinteren Fersenkante* und *Auftreffen auf ein Hindernis* in der Mitte zwischen Zehengelenk und Stützstruktur. In Matlab wurden für beide Lastfälle Gleichungen aufgestellt, die die maximale Durchbiegung in Abhängigkeit von der Position der Stützstruktur abbilden. Die optimale Lagerposition ist gefunden, wenn die Durchbiegung bei beiden Lastfälle gleich groß ist. Eine Abweichung der Stützstrukturposition würde eine der beiden Durchbiegungen erhöhen. Die Rechnungen sind im Anhang A.2.1 zu finden.

Für zusätzliche Stabilität sorgt eine vorgesehene Schraubverbindung zwischen Sohlenstruktur und Stützstruktur bei steifer Zehenverbindung. Die Sohlenstruktur sieht vier Gewinde vor, um Leiterplatinen anzuschrauben. Auf diesen werden die Kabel der Sensormatte angeschlossen und



Bild 4.11: Aufbau der monolithischen Sohle



Bild 4.12: Darstellung der beiden Biege-Extremfälle

zu einem zusammengeführt. Das unterstützt das modulare Design, da der Austausch der Sohle inklusive Sensormatte nur ein Kabel umgesteckt wird.

4.4 Bodentopologieerfassung

Wie in Kapitel 3 angekündigt werden in diesem Anschnitt Experimente durchgeführt, um die Machbarkeit der berührungslosen Abstandsmessung zu validieren. Die Messung soll es ermöglichen eine Karte der Bodentopologie zu erstellen, durch Trajektorienanpassung darauf zu reagieren und somit die Stabilität zu erhöhen. Im Experiment werden folgende Schritte durchlaufen.

- 1. Fragestellungen
- 2. Hypothese
- 3. Verwendete Materialien
- 4. Versuchsaufbau und -durchführung
- 5. Beobachtung und Auswertung

Fragestellung: Es ist zu klären, ob die berührungslosen Ultraschall- oder Infrarotsensoren dazu geeignet sind, die Bodentopologie während der Schwungphase unter der Fußsohle aufzuzeichnen. Als Kriterium zur Erkennung wird ein Würfel mit einer Seitenlänge von 10 mm festgelegt. Die Erkennung befähigt Lola dazu, auf solche Hindernisse zu reagieren, beispielsweise indem der Fuß vor dem eigentlichen Kontakt abgebremst wird.

Hypothese: Es wird erwartet, dass der Bodenabstand mindestens alle 10 ms (~ 5 mm) bei einer Genauigkeit von ± 10 mm durch einen Sensor gemessen wird und so Rückschlüsse auf Hindernisse unter dem Fuß liefert. Es wird vermutet, dass die Messergebnisse des Ultraschallsensors für eine Bodentopologieerkennung zu sehr schwanken, da der Sensor schon bei ersten Tests bei Bewegungen, nahen Entfernungen und schrägen Gegenständen ungenaue Ergebnisse liefert.

Verwendete Materialien: Bevor das Experiment durchlaufen wird, werden die Sensoren ausgewählt. Dabei werden folgende Anforderungen aufgestellt. Der Messbereich beginnt bei höchstens 4 cm und endet bei mindestens 30 cm, um den gesamten Bereich auch bei großen Schritthöhen abzudecken. Messabweichung, Bauraum und Preis sollten möglichst gering sein. Ein großer Messkegel erhöht die gemessene Fläche und reduziert so die Anzahl der benötigten Sensoren. Mit mehreren Sensoren steigt jedoch die Auflösung über die Fußbreite. Daher ist eine höhere Anzahl an Sensoren zu empfehlen. Allerdings muss die Anzahl der Sensoren zusammen mit der zeitlichen Auflösung betrachtet werden, da die Sensoren nacheinander die Messergebnisse liefern, um sich nicht gegenseitig zu stören. Ist die Dauer zwischen zwei Messungen zu groß, wird die Auflösung in Laufrichtung zu gering. Daher wird das Kriterium Messkegel zunächst vernachlässigt und in einem separaten Experiment untersucht. Ausgewählt wurde der Ultraschallsensor *SRF-10* von *Devantech* [11] mit einem Erfassungsbereich von 4 cm-6 m und einem Bauraum von 32 x 15 x 10 mm. Laut Datenblatt benötigt die Messung 65 ms. Durch Reduzierung der Reichweite sind Messraten von 10 ms möglich. Die Auflösung schwankt bei Ultraschallsensoren, da Bewegungen, schräge Oberflächen, Vibrationen, die Entfernung zum Hindernis und Mehrfachechos die Messung beeinflussen. Aus diesen Gründen ist auch die reale Testumgebung direkt an Lola empfehlenswert. Als Infrarotsensor wurde der *GP2YOA41SKOF* von Sharp [40] ausgewählt. Der Erfassungsbereich liegt bei 3-30 cm, der Bauraum bei 29.5 x 13.0 x 13.5 mm und die Auflösung liegt im Millimeterbereich. Die Initialisierungsdauer liegt bei 44 ms, danach wird mit unter 1 ms abgetastet, da das Messsignal analog ist. Der Messfleck liegt bei einem Abstand von 50 mm bei 5 mm, was einem Messkegel von 5.7° entspricht).

Neben den Sensoren *SRF-10* und *GP2Y0A41SKOF* werden zur Durchführung des Experiments ein Arduino Uno, der die Messwerte aufzeichnet, der Roboter Lola und eine Halterung der Sensoren an der Zehe benötigt. Die Halterung wurde so gestaltet, dass sich die Sensoren in einem Abstand von mindestens 40 mm über dem Boden befinden, damit die Messwerte im Erfassungsbereich liegen. Der Infrarotsensor wird, wie im Datenblatt empfohlen, quer zur Laufrichtung angebracht um Messfehler zu minimieren.

Versuchsaufbau und -durchführung: Die beiden Sensoren werden an der Zehenspitzenhalterung befestigt. Auf der Strecke vor Lolas Füßen werden zwei Hindernisse platziert, siehe Abbildung 4.13. Der Mikrocontroller ist so programmiert, dass die Sensordaten aufzeichnet werden, sobald der Fuß von Lola abhebt und daher ein Grenzabstand überschritten wird. Zu jedem Messwert wird die jeweilige Zeit mit aufgezeichnet. Lolas Schritthöhe wird auf 10 cm eingestellt, um die Hindernisse zu übersteigen. Die anderen Parameter bleiben auf Default (0.8 s Schrittdauer, 0.4 m Schrittweite). Zur Durchführung wird Lola gestartet und übersteigt beide Hindernisse mit einem Schritt. Der darauffolgende Schritt überschreitet keine Hindernisse und dient später als Referenz. Die Messwerte werden in eine Exceltabelle übertragen.

Beobachtung und Auswertung: Die Zehenspitze mit dem Sensor steigt wie erwartet über die Hindernisse hinweg und die Daten werden aufgezeichnet. Die Messwerte werden mit Matlab eingelesen. Die Messwerte des Ultraschallsensors schwanken so stark, dass nicht mal das große Hinderniss erkannt wird. Auch beim Infrarotsensor werden keine genauen Werte erhalten, weil Dauer zwischen den Messungen durch das nacheinander abfolgende Abtasten von Ultraschallsensor und Infrarotsensor groß ist.

Daher wurde noch eine Messung nur mit Infrarotsensor gestartet. Die Umrechnung der ausgelesenen analogen Spannung des IR-Sensors wurden diesmal nicht im Arduino berechnet, sondern nur die analogen Daten aufgezeichnet, damit die Messfrequenz weiter erhöht wird. Somit wurde alle



Bild 4.13: Konfiguration der Hindernisse

0.5 ms ein Messwert aufgezeichnet. Die Umrechnung der analogen Daten wurde nachträglich mit Matlab durchgeführt. Die Messwerte des Schrittes mit Hindernissen werden von den Messwerten ohne Hindernisse abgezogen. Die Extremwerte werden dann mit einem Hampel-Filter entfernt und der Graf zusätzlich geglättet. Am Graphen in Abbildung 4.14 sind an den Stellen, an denen der Infrarotsensor die Hindernisse detektiert hat, Erhebungen zu erkennen. Die Abweichungen der Messung befinden sich in einem Intervall von 1 mm und −6.3 mm, siehe Abbildung 4.14. Die aufgezeichneten 1600 Messwerte in den 0.8 s Swungphase entsprechen bei der Schrittweite von 40 cm durchschnittlich einem Messergebnis alle 0.25 mm. Durch eine empfohlene Glättung wird der Durchschnitt aus acht Messungen genutzt und somit alle 2 mm ein gemittelter Wert generiert. Eine Erkennung von 10 mm großen Hindernissen ist also möglich. Dieser Wert kann an die Steuerung von Lola geschickt werden und damit beispielsweise bei der Erkennung von einem Hindernis den Fuß vor dem Kontakt abbremsen, um hohe Aufprallkräfte zu vermeiden.

Über die Fußbreite sollen mehrere IR-Sensoren Messergebnisse liefern, damit keine Hindernisse übersehen werden. Die Werte zeitlich nacheinander abzufragen ist nicht möglich, da die Sensoren eine zu lange Initialisierungsdauer von 44 ms benötigen. Ein Experiment soll untersuchen, ob es möglich ist, mehrere IR-Sensoren nebeneinander gleichzeitig zu nutzen. Dazu wurden die Messwerte des einen Sensors aufgezeichnet, während die Infrarot-LED eines zweiten 4 cm entfernten Sensors angeschaltet war. Der Sensor wurde durch die Störquelle stark beeinflusst. Eine 4 cm lange Abschirmung aus Karton zeigte leichte Verbesserung des Signals. Werden die Sensoren dazu noch parallel angebracht mit einem Mindestabstand von 2 cm, ist bis 15 cm Messweite keine gegenseitige Beeinflussung zu erkennen, siehe Abbildung 4.15. Es wird kein Unterschied festgestellt, ob der Sensor einzeln betrieben wird (a) oder ein abgeschirmter IR-Sensor nebenan liegt (b). Jedoch wird das Signal verschlechtert, wenn die Abdeckung abgenommen wird (c). Ab einem Messabstand von 17 cm beginnt man auch mit Hülle eine leichte Verschlechterung des Signals festzustellen (hier nicht dargestellt). Dies ist aber im Vergleich zu den Vorteilen hinzunehmen,



Bild 4.14: Errechnung des Bodenprofils



Bild 4.15: Messergebnisse der verschiedenen Mess-Konfigurationen bei 15 cm Messabstand

da mit Umhüllung auf der Fußbreite von 220 mm 14 Sensoren angebracht werden können ohne sich gegenseitig zu stören. Es ist möglich modulierte IR-Sensoren nebeneinander zu betreiben, die sich gegenseitig nicht beeinflussen, die aber deutlich teurer sind. Bei einer hohen Anzahl an Sensoren sind daher die kostengünstigen Sharp-IR-Sensoren empfehlenswert.

Aufbau des Sensorhalters

Der Sensorhalter ist so gestaltet, dass zehn IR-Sensoren (1) nebeneinander angeordnet sind, siehe Abbildung 4.16. Die Aussparungen (2) verringern das Gewicht und bieten Durchführungen für die Kabel. Durch die Ausrichtung der Aussparungen in Laufrichtung werden die Schwingungen des Sensorhalters beim Gehen verringert. Durch die lösbaren Schraube-Mutter-Verbindungen (3) ist der Austausch der Sensoren möglich. Die Schnittstelle zum Zehensegment unterstützt das modulare Design und erlaubt schnelles und einfaches Auswechseln des Sensorhalters.





Kapitel 5

Diskussion

Eine Kombination der DRM-Forschungsmethodik und des Münchner Vorgehensmodells hat sich als hilfreich erwiesen. Die Forschungsmethodik hat den Rahmen für das Gesamtvorgehen gegeben und das MVM hat die letzten beiden Stufen *präskriptive Studie* und *deskriptive Studie 2* durch einen strukturierten Problemlöseprozess unterstützt. Durch das flexible Vorgehensmodell wurden Iterationen erlaubt und somit eine anforderungsgerechte Lösung entwickelt.

Zehenaktor

Das große Gewicht des aktiven Zehenaktors trägt signifikant zu den Trägheitsmomenten des Beines bei. Eine Verlegung des Zehenaktors weiter nach oben ist schwierig, da eine Änderungskonstruktion des Unterschenkels zu aufwendig ist und viele der Konzepte eine parallele Kinematik darstellen. Das mit Geogebra erstellte Softwarewerkzeug hat sich als hilfreich herausgestellt, um die Bewegungsmechanismen zu analysieren. Die Verwendung des Softwarewerkzeugs ist bei zukünftigen Kinematiken zu empfehlen. Aufgrund der Probleme ist der Zehenaktor weiterhin im Zehengelenk integriert. Allerdings würde eine Verlegung des Aktors in den Unterschenkel eine signifikante Verbesserung der Dynamik bewirken. Bei einer Neukonstruktion des gesamten Beines sollte dies berücksichtigt werden und eine der vorgestellten Lösungen aus Abschnitt 3.2 implementieren.

Um die Motoren auszuwählen, hat es sich als sinnvoll herausgestellt ein Matlab-Modell des Bewegungsmusters zu erstellen und das Drehmoment-Geschwindigkeitskurve mit den Motorkennlinien zu vergleichen. In dieses Modell wurde auch die Integration einer Drehfeder untersucht. Diese reduziert sowohl das maximal benötigte Drehmoment als auch das durchschnittlich benötigte Drehmoment. Ob ein lineares, degressives oder progressives Federverhalten genutzt wird, spielt nahezu keine Rolle. Falls Abweichungen in der realen Verwendung auftreten oder andere Bewegungsmuster unterstützt werden sollen, ist die Feder einfach austauschbar und der Schenkelwinkel einstellbar konstruiert. Weitere Bewegungsmuster können mit dem Matlab-Modell integriert werden und so die Feder für die optimale Unterstützung gefunden werden.

Die Bestimmung des Wärmewiderstandskoeffizienten hat sich als schwierig herausgestellt. Das Experiment musste abgebrochen werden, um Lola nicht zu beschädigen. Eine experimentelle Bestimmung des Wärmewiderstandskoeffizienten wäre jedoch für zukünftige Projekte sinnvoll, um Motoren genauer auszuwählen. Dazu wäre eine Motorhalterung zu konstruieren, die der Einbausituation im Roboter in Bezug auf Wärmekapazität und Wärmewiderstand ähnlich ist. An dieser Motorhalterung wäre es möglich, realistische Motorkennlinien zu messen, mit denen zukünftige Motoren ausgewählt werden können. Dennoch konnte durch den Vergleich des simulierten Lastprofils mit den Motorkennlinien aus dem Datenblatt des Herstellers ein geeigneter Motor ausgewählt werden.

Sohle

Verschiedene Sohlenkonzepte wurden erstellt und untersucht. Dabei ist die Idee der monolithischen Sohle interessant, da das Unterstützungspolygon auch beim Zehengehen gleichbleibt. Im Vergleich einer geteilten Sohle werden weniger Bauteile benötigt, die Komplexität sinkt und die Sensormatte bleibt ganz. Dies löst die Bedenken von Staufenberg, dass die Drehmomente beim Treppensteigen über kleine Zehenflächen nicht übertragen werden können [41]. Die monolithische Sohle hat den weiteren Vorteil, dass eine aktive Dämpfung realisierbar ist. Weiterhin dient gesamte Sohlenfläche zur Dämpfung. Kräfte- und Momentenübertragung über größeren Flächenkontakt verbessern die Steifigkeit gegenüber kleinerem Flächenkontakt [31]. Die Aufprallkräfte müssen über die Stützstrukturen abgeleitet werden. Dies muss nach der Fertigung in der Realität untersucht werden. Falls die Ableitung der Kräfte nicht funktioniert, könnten die Drehmomente im Zehengelenk zur Entmagnetisierung des Motors führen. Die Untersuchung der Dämpfungseigenschaften ist jedoch aufwendig. Die Regelung wird in Bezug auf die Dämpfung experimentell optimiert. Daher wurde eine zweite Sohlenvariante konstruiert, die ähnlich der bestehenden Sohle ist, um das Risiko einer nicht verwendungsfähigen Sohle zu minimieren und der Konstruktionsaufwand gering ist. Wegen des undetaillierten Dämpfungsmodells in der Regelung ist es schwierig, Konstruktionsempfehlungen aus der MKS-Simulation abzuleiten. So war es beispielsweise nicht möglich die Notwendigkeit des Industriestoßdämpfers zu bestätigen.

Das Vorgehen zur Konstruktion einer gewichtsoptimierten Sohlenstruktur hat sich als erfolgreich herausgestellt. Das Software-Werkzeug *solidThinking Inspire* hat sich gut in den Arbeitsprozess mit CATIA integriert. Einzig die Umsetzung der generierten Geometrie in ein fertigungsreifes Bauteil ist mit erheblichen Konstruktionsaufwand verbunden. Ein solches Vorgehen ist daher nur für Bauteile mit hohem Einsparpotential empfehlenswert. Die Lösungsfindung über die Bionik war über die Integration einer Bienenwabenstruktur für weitere Masseeinsparung erfolgreich. Da die Masse des Fußes eine große Rolle spielt, sollten, wenn es die Bedingungen erlauben, auch passive oder steife Zehenkonstruktionen in Erwägung gezogen werden. Bei der Konstruktion der Sohle wurde daher darauf geachtet, das modulare Design weiterzuführen. Ein Austausch und damit die Anpassung an verschiedene Umgebungsbedingungen ist möglich. Auch bei der Entwicklung erwies sich der modulare Aufbau als hilfreich. Dadurch, dass die Sohlenelemente austauschbar und kompatibel sind, ist auch die Zahl der zu konstruierenden Teile gesunken. Die Komponenten sind durch gut definierte Schnittstellen getrennt und wurden so unabhängig voneinander betrachtet, was zu verminderter Komplexität des Entwicklungsprozesses führt.

Sensoren

Bei den verschiedenen Konzepten zur Bodenmessung wurden die berührungslosen Sensoren ausgewählt, da diese nicht an Hindernissen hängenbleiben. Das Experiment an Lola hat gezeigt, dass der IR-Sensor 1 cm große Hindernisse erkennt. Der Ultraschallsensor hat eine schlechtere Auflösung und Messfrequenz und wird leichter durch Schwingungen und schräge Messflächen irritiert. Das Experiment mit zwei nebeneinander angebrachten IR-Sensoren zeigt, dass diese sich bis 15 cm Messabstand gegenseitig nicht beeinflussen, wenn eine 4 cm lange Umhüllung aus Karton angebracht wird. Daher ist es möglich 10 IR-Sensoren an einem Fuß mit Messfrequenzen von 2000 Hz parallel zu betreiben. Die Auflösung der IR-Sensoren wird mit -1 bis 6 mm gemessen. Mithilfe der Sensorwerte kann der Fuß abgebremst oder die Trajektorie verändert werden.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine neuartige Fußgeometrie für den humanoiden Roboter Lola entwickelt. Der Fuß wurde dabei mit einer monolithischen Sohlenkonstruktion, einer höheren Motorleistung und berührungslosen Sensoren zur Bodentopologieerfassung ausgestattet.

In der ausführlichen Literaturrecherche wurde die Biomechanik des menschlichen Fußes und verschiedene Fußkonstruktionen humanoider Roboter untersucht. Dabei wurden Konzepte zu Zehengelenkskonstruktionen, Adaption an unebenes Terrain und Bodentopologieerfassung behandelt.

Als Orientierungsgrundlage wurden Anforderungen an den Fuß festgelegt. Der Zehenaktor wurde verstärkt, um Bewegungen wie Treppauf- und Treppabsteigen auszuführen. Um das Trägheitsmoment zu reduzieren, wurden verschiedene Antriebskonzepte erarbeitet, den Zehenaktor in den Unterschenkel zu verlegen. Zur kinematischen Analyse der Antriebskonzepte wurde ein Softwarewerkzeug mit Geogebra erstellt. Damit wurde der benötigte Bauraum identifiziert und diente somit als Entscheidungsgrundlage. Zur Auswahl des Motors wurde das Bewegungsprofil des Treppaufsteigens in Matlab modelliert und mit Motorkennlinien verglichen. Mithilfe des Matlab-Modells wurde gezeigt, dass die Integration einer Drehfeder das benötigte maximale und durchschnittliche Drehmoment reduziert. Diese Erkenntnis wurde durch eine einstellbare Drehfeder bei der Konstruktion berücksichtigt.

Für die Sohle, die eine durchgängige Aufstandsfläche besitzen soll, wurden verschiedene Konzepte erarbeitet und verglichen. Dabei wurde speziell auf die Dämpfung der Aufprallkraft eingegangen. Analysen mit der MKS-Simulation wurden durchgeführt, um Konstruktionsempfehlungen abzuleiten. Die Zehenplatte wurde verlängert und bildet so eine monolithische Sohle. Durch diese bleibt der Sohle-Boden-Kontakt gleich, wenn das Sprunggelenk angehoben wird. Das Unterstützungspolygon bleibt also gleich groß, wodurch die Stabilität beim Zehengehen erhöht wird. Durch Auslenkung der Sohle ist zudem ein aktiver Dämpfungsmechanismus möglich. Mithilfe einer bionischen Optimierung und Anwendung einer Bienenwabenstruktur der Sohlenkonstruktion wurde das Gewicht und somit das Trägheitsmoment minimiert. Es wurde eine zweiteilige Variante der Sohle konstruiert, die ein Fersenkontaktelement besitzt. Dieses kann an den Dämpfungsmechanismus der Ausgansfußkonstruktion angebracht werden.

Zur Bodentopologieerfassung wurden mehrere Konzepte erarbeitet und ausgewählt. Um zwischen Ultraschallsensoren und Infrarotsensoren zu entscheiden, wurden Experimente am Laufroboter Lola durchgeführt. Durch zehn Infrarot-Sensoren an der Zehenvorderkante wird der Abstand zum Untergrund in der Schwungphase berührungslos gemessen. Die Sensordaten wurden dazu in eine Darstellung der Bodentopologie übersetzt. Hindernisse, die größer als 1 cm sind, werden mit 2 kH Messfrequenz erfasst.

Ausblick

Eine Leistungssteigerung des Zehenaktors erhöht das Gewicht. Um das Trägheitsmoment des Fußes zu verringern, sollte der Zehenaktor in den Unterschenkel verlegt werden. Da eine aufwendige Veränderung der gesamten Beinstruktur nötig wäre, bleibt der Motor jedoch im Fußgelenk. Bei einer Neukonstruktion des Beines sollte eine Verlegung berücksichtigt werden.

Wegen des undetaillierten Dämpfungsmodells in der Regelung ist es schwierig, Konstruktionsempfehlungen aus der MKS-Simulation abzuleiten. Eine Erweiterung des Modells, dass auch den Stoßdämpfer integriert, würde helfen die Auswirkungen des Dämpfungsverhaltens zu analysieren.

Die Auslenkung der monolithischen Sohlenkonstruktion ermöglicht es, einen aktiven Dämpfungsmechanismus zu realisieren. Dabei wird die Zehe während der Schwungphase abgewinkelt. Sobald Bodenkontakt besteht, wird die Zehe angezogen bis die Standphase erreicht wird. Dadurch wird die Zeitdauer der Energiedissipation der Dämpfschicht verringert und so die Aufprallkraft reduziert. Besonders bei der Umsetzung von Bewegungen mit hoher Stoßbelastung, wie dem Rennen, ist eine aktive Dämpfung interessant. Eine Integration dieses Dämpfungsmechanismus in die Regelung ist zu empfehlen.

Auf unebenen Terrain werden andere Sohlenkonstruktionen benötigt als bei Laborbedingungen. Die Literaturrecherche hat ergeben, dass eine Anpassung an unebenes Terrain, bei dem das Supportpolygon gleich groß bleibt, zu empfehlen ist. Die Anforderung einer durchgängigen Sohle schränken den Designraum stark ein, da eine physische Anpassung an Bodengegebenheiten durch punktförmige Kontakte, wie bei den vier sperrbaren Stäben von [18] nicht möglich ist. Der Mechanismus ließe sich gut in die monolithische Sohle integrieren.

Kenntnisse über die Bodentopologie können in Zukunft dazu genutzt werden, den Fuß vor Kontakt abzubremsen und so große Aufprallkräfte zu vermeiden. Die Information, wo sich Hindernisse befinden, kann dazu genutzt werden die Fußtrajektorie anzupassen, um den Hindernissen auszuweichen.

Anhang A

Anhang

A.1 Auslegung Konzepte

A.1.1 Riemenantrieb

Der Arbeitsraum für Adduktion und Abduktion beim Sprunggelenk ist jeweils 35 Grad. Um nicht an den Seiten anzustoßen, darf der Bauraum nach oben in den Unterschenkel nicht breiter als 8 mm sein, siehe A.1. Ein Riemenantrieb mit einem Scheibendurchmesser von 8 mm ist zu schwach. Das Drehmoment um den Roboter mit einem Fuß anzuheben ist bei 60 Kg und 0.13 m Hebellänge nach, $M = F \cdot r = 78$ Nm. Damit wäre die Zugkraft nach gleicher Formel im Riemenzug (bei einer Hebellänge von 4 mm) 19.5 kN. Dies würde sogar ein Zahnriemen, der mehr Drehmoment aufnimmt als ein Flachriemen, nicht aushalten.



Bild A.1: Bauraum im Universalgelenk

A.1.2 Bowdenzug

Der Arbeitsraum für Flexion in der Zehe ist nach [31] 62 Grad. Bei einer Hebellänge von 70 mm, ergibt sich mit eine Hublänge von 72 mm. Das Drehmoment um den Roboter mit einem Fuß anzuheben ist bei 60 Kg und 0.13 m Hebellänge nach, $M = F \cdot r = 78$ Nm. Bei einer Hebellänge von 70 mm ergibt sich eine Zugkraft von 1.1 kN im Bowdenzug. Laut Datenblatt von Ringspann [**Ringspann.2017**] ergibt sich bei der benötigten Baugröße M ein Mindest-Biegedurchmesser von 127 mm, eine Einbaulänge von 147 mm und der Hub von 72 mm, siehe A.2. Dies ergibt eine be-



Bild A.2: Bauraum des Bowdenzugs (nicht maßstabsgetreu).

nötigte Länge von 346 mm gegenüber den verfügbaren 280 mm Fußlänge. Der Sicherheitsfaktor ist noch nicht mit eingerechnet.

A.2 Auslegung Diverses

A.2.1 Bestimmung des Auflagepunkts

Wenn die Durchbiegungen w_1 an der Stelle $\left(\frac{a+b}{2}\right)$ und w_2 an der Stelle 0 gleich groß sind, dann ist die optimale Lagerposition a gefunden, siehe Abbildung A.3. Die Biegesteifigkeit (EI) und die größe der Kraft F spielen keine Rolle, da die Durchbiegungen voneinander abgezogen werden.



Bild A.3: Balkenmodelle der zwei Lastfälle

Lastfall1:

Lagerkraft A1: A1=0.5, da A1 und B1 gleich weit von F1 (=1) entfernt

$$M(x) = 0.5\langle x - a \rangle - \langle x - \frac{a+b}{2} \rangle$$

$$E \cdot I \cdot w'_{1}(x) = \frac{1}{4}\langle x - a \rangle^{2} - \frac{1}{2}\langle x - \frac{a+b}{2} \rangle^{2} + C_{31}$$

$$E \cdot I \cdot w_{1}(x) = \frac{1}{12}\langle x - a \rangle^{3} - \frac{1}{6}\langle x - \frac{a+b}{2} \rangle^{3} + C_{31} \cdot x + C_{41}$$

Berechnung von C_{31} und C_{41} : Mit den Bedingungen $w_1(a)=0$ und $w_1(b)=0$ ergibt sich: $w_1(a) = w_1(b)$ $\frac{1}{6}\langle a - \frac{a+b}{2} \rangle^3 + C_{31} \cdot a + C_{41} = \frac{1}{12}\langle b - a \rangle^3 - \frac{1}{6}\langle b - \frac{a+b}{2} \rangle^3 + C_{31} \cdot x + C_{41}$ nach C_{31} auflösen aus $w_1(a)=0$ folgt: $C_{41} = \frac{1}{6}\langle a - \frac{a+b}{2} \rangle^3 + C_{31}$

Lastfall2:

Lagerkraft A2: Moment um B2: $b \cdot F2 = (b-a) \cdot B2$, daraus folgt $B2 = 1 \cdot \frac{b}{b-a}$

 $M(x) = \langle x \rangle - \frac{b}{a} \langle x - a \rangle$ $E \cdot I \cdot w'_2(x) = 0.5 \langle x \rangle^2 - \frac{b}{2 \cdot a} \langle x - a \rangle^2 + C_{32}$ $E \cdot I \cdot w_2(x) = \frac{1}{6} \langle x \rangle^3 - \frac{b}{6 \cdot a} \langle x - a \rangle^3 + C_{32} \cdot x - C_{42}$

Berechnung von C_{32} und C_{42} : mit den Bedingungen $w_2(a)=0$ und $w_2(b)=0$ ergibt sich: $w_2(a) = w_2(b)$ $\frac{1}{6}\langle a \rangle^3 - \frac{b}{6 \cdot a}\langle a - a \rangle^3 + C_{32} \cdot a - C_{42} = \frac{1}{6}\langle b \rangle^3 - \frac{b}{6 \cdot a}\langle b - a \rangle^3 + C_{32} \cdot b - C_{42}$ aus $w_2(a)=0$ folgt: $C_{42} = \frac{1}{6}\langle a \rangle^3 - \frac{b}{6 \cdot a}\langle a - a \rangle^3 + C_{32} \cdot a$

Wenn die Bedingung $w_1(\frac{a+b}{2}) = w_2(0)$ erfüllt ist, sind die Durchbiegungen gleich groß. Die Formeln wurden in Matlab übertragen. Abbildung A.4 zeigt einen Plot, bei dem die Lagerposition von a gegenüber $w_1(\frac{a+b}{2}) - w_2(0)$ geplottet ist. Bei a=63 mm ist $w_1(\frac{a+b}{2}) - w_2(0) = 0$ erfüllt und damit die optimale Lagerposition gefunden.



Bild A.4: Plot der Lagerposition. Bei a=63 mm ist $w_1(\frac{a+b}{2}) - w_2(0) = 0$ erfüllt

A.2.2 Schraubenauslegung, Drehfederhalter

Formel für Klemmkraft bei einem Flansch zur Übertragung eines Drehmoments:

$$F_{K,erf} = \frac{2 \cdot M}{n \cdot \mu_T \cdot d_L} \cdot S_Q$$

 $F_{K,erf}$ = erf. Klemmkraft bei Drehmomentbelastung (N, hier 6300 N (M4, Festigkeitsklasse 10.9) nach [39])

M = Drehmoment (Nmm, gesucht)n = Anzahl Schrauben (hier 2)

 μ_T = Haftreibwert Trennfuge (bei EkaGrip 0.6-0.7 [13])

 d_L = Lochkreisdurchmesser (mm, hier 88 mm)

 S_Q = Sicherheitsfaktor für dynamische Querkraftübertragung (2-3, hier 3)

Auflösen nach Drehmoment M ergibt M = 111 Nm. Das bedeutet, dass 111 Nm sicher übertragen werden können. Die Analyse mit Matlab ergab für das erforderliche Drehmoment der Feder M_{erf} = 41 Nm, also weit unter den errechneten 111 Nm.

A.2.3 Dauerfestigkeitsberechnung

Als Material wurde bei den Bauteilen der Leichtbauwerkstoff AlZnMgCu1,5 EN AW-7075 genutzt, der aufgrund der geringen Masse in der Luftfahrtindustrie verwendet wird. Im Material-Datenblatt wird die Dauerfestigkeit mit 159 MPa angegeben [2, 38]. Mithilfe diesen Wertes konnten die Ergebnisse der FEM-Spannungs-Analysen in CATIA abgeglichen werden.

A.3 Auslegung Motor

A.3.1 Motorkennlinien gesamt



Bild A.5: Motorkennlinien der in Lola verwendeten Motoren, sowie weiterer für den Zehenaktor interessanten Motoren K064050-8D und K044100-5Y

Motorenvergleich von Lohmeier A.3.2

Motorenvergleich von Lohmeier [31].



- B C D

55



				Load	rating	Gear	
Drive	Mass	Motor inertia	Top speed	Continuous	Peak	Туре	Ratio
	m[kg]	J_m [kgm ²]	$\varphi_{l,max}[rad/s]$	$\tau_{l,avg}[Nm]$	τ _{l, max} [Nm]		N [-]
Rotary act	Rotary actuators based on harmonic drive ge		onic drive ge	ars (cf. Sect	ion 3.4)		
A	3.010	1.814·10 ⁻⁴	12.06	122*	243*	CSG-32	50
В	1.438	4.598·10 ⁻⁵	8.16	108 ⁺	284 ⁺	HFUC-25	100
С	1.522	4.598-10 ⁻⁵	8.16	108 ⁺	284 [†]	HFUC-25	100
D	0.933	$1.960 \cdot 10^{-5}$	8.16	78*	147 ⁺	HFUC-20	100
E	1.082	2.375·10 ⁻⁵	8.16	78*	147†	HFUC-20	100
F	0.973	$1.385 \cdot 10^{-5}$	9.17	54†	110^{+}	HFUC-17	100
G	0.531 3.809.10 ⁻⁶		10.68	10.68 24* 48*		CPL-14	100
Linear actuators based on planetary roller screws (cf. Sections 3.8.2 and 3.8							
Knee	1.931	5.544.10-5	10.68	≤189*	≤378*	RGTF-12×5	≤72
Ankle	0.516	1.544·10 ^{-5‡}	10.68	≤115*	≤230*	RGTF-8×5	≤70
Stereo car	nera hea	ad actuators (d	f. Section 3.	5)			
Pan	0.237	5.00.10-7	8.90	0.90	7.50	CSF-11	100
Tilt	0.066	7.310.10 ⁻⁸	10.47	0.44	1.40 [†]	RSF-5A	100
Vergence	0.031	1.170.10 ⁻⁸	10.47	0.11	0.30 [†]	RSF-3B	100

Limited by inverter current Limited by gear rating Only motor, motor-side transmission components are not considered ŧ

		Torque	rating	Constants				
Drive	Motor type*	Continuous $\tau_{m,c}$ [Nm]	Peak τ _{m,p} [Nm]	Torque K _τ [Nm/A]	Motor $K_m [\text{Nm}/\sqrt{W}]$	Time T _{el} [ms]		
Rotary act	uators based on harmo	nic drive ge	ars (cf. Se	ction 3.4)				
А	PB K375100-4D	3.0	4.85 [†]	0.097	0.267	1.53		
В	PB K064075-7Y	0.85	2.56	0.130	0.122	1.60		
С	PB K064075-7Y	0.85	2.56	0.130	0.122	1.60		
D	PB K064050-9D	0.62	1.56^{+}	0.078	0.087	0.96		
E	PB K064025-GD	0.31	0.93	0.080	0.048	0.58		
F	PB K064025-GD	0.31	0.93	0.080	0.048	0.58		
G	PB K044025-JY	0.12	0.48	0.020	0.39			
Linear actu	ators based on planet	ary roller sc	rews (cf. S	ections 3.8	3.2 and 3.8.3)		
Knee	PB K375050-5Y	1.72	5.14	0.105	0.153	1.45		
Ankle	PB K064050-8Y	0.62	1.87	0.109	0.087	1.15		
Stereo camera head actuators (cf. Section 3.5)								
Pan	WI MSSI 022H-017C	0.025	0.09 [†]	0.009	0.075	0.10		
Tilt	HD RSF-5A	0.004	0.014	0.011	0.008	0.32		
Vergence	HD RSF-3B	0.001	0.003	0.038	0.023	0.13		

 $\label{eq:PB} PB = Parker Bayside [141]; HD = Harmonic Drive [60]; WI = Wittenstein [202]. \\ Limited by inverter current$ *

A.3.3 Motortabelle von Parker Bayside

Motortabelle von Parker Bayside [33].

Frameless **Motor Series**

KO32 to KO254 Motors

Performance Specifications (six step/trapezoidal commutation)

Frame	Stack e Length		Stack Length		Conti Torq	inuous Jue ⁽¹⁾	P Toi	eak rque	Mo Cons	tor stant	Core Loss	Rotor Inertia		Rotor Inertia		or Electrical Thermal tia Time Resistance Constant		Weight	
0120			т _с		Тp		К _т		P _C	Jm		T _C		Wm					
	(mm)	(in)	(Nm)	(oz in)	(Nm)	(oz in)	(Nm /√W)	(oz in / ₁ / W)	W @1kRPM	(gm cm sec²)	(oz in sec ²)	(msec)	(⁰ C / W)	(kg)	(0Z)				
K032025	6.35	0.25	0.044	6.3	0.095	13.5	0.009	1.25	0.03	0.0016	0.000022	0.21	3.44	0.042	1.5				
K032050	12.7	0.5	0.08	11.4	0.188	27	0.016	2	0.06	0.0032	0.000045	0.35	3.44	0.068	2.4				
K032075	19.05	0.75	0.11	15.7	0.281	40	0.022	3	0.09	0.0048	0.000067	0.44	3.44	0.096	3.4				
K032100	25.4	1	0.136	19.4	0.375	54	0.027	4	0.12	0.0064	0.000089	0.5	3.44	0.122	4.3				
K032150	38.1	1.5	0.181	25.8	0.544	77.7	0.036	5.15	0.18	0.0096	0.000134	0.6	3.44	0.173	6.1				
K032200	50.8	2	0.22	31.1	0.654	93.4	0.044	6.25	0.24	0.013	0.000178	0.66	3.44	0.26	9.2				
K032300	76.2	3	0.33	46.5	0.99	139.5	0.054	7.56	0.36	0.0192	0.000268	0.7	3.44	0.36	12.8				
K044025	6.35	0.25	0.119	17	0.357	50	0.02	3	0.11	0.0072	0.0001	0.39	2.36	0.085	3				
K044050	12.7	0.5	0.214	30.6	0.642	90	0.035	5	0.24	0.014	0.0002	0.62	2.36	0.133	5				
K044075	19.05	0.75	0.297	42.4	0.891	127	0.049	7	0.37	0.022	0.0003	0.76	2.36	0.200	7				
K044100	25.4	1	0.364	52	1.092	156	0.06	9	0.49	0.03	0.00041	0.89	2.36	0.224	8				
K044150	38.1	1.5	0.501	71	1.510	213	0.08	11.4	0.74	0.044	0.00061	1.05	2.36	0.311	11				
K044200	50.8	2	0.607	86	1.820	258	0.097	13.8	1.11	0.06	0.00082	1.12	2.36	0.399	14.1				
K044300	76.2	3	0.96	136.0	2.88	408	0.13	18.3	1.48	0.088	0.00122	1.3	2.36	0.549	19.4				
K064025	6.35	0.25	0.31	44.3	0.93	133	0.048	6.88	0.37	0.046	0.00064	0.59	1.68	0.142	5				
K064050	12.7	0.5	0.62	89	1.87	267	0.087	12.48	0.78	0.092	0.00128	0.98	1.68	0.286	10.1				
K064075	19.05	0.75	0.85	121.7	2.56	365	0.122	17.44	1.19	0.138	0.00192	1.26	1.68	0.427	15.1				
K064100	25.4	1	1.08	154	3.23	462	0.15	21.44	1.6	0.184	0.00256	1.47	1.68	0.572	20.2				
K064150	38.1	1.5	1.46	209	4.39	627	0.204	29.12	2.37	0.276	0.00384	1.77	1.68	0.846	30.2				
K064200	50.8	2	2.16	308	6.47	924	0.244	34.88	3.23	0.369	0.00512	1.97	1.68	1.129	40.3				
K064300	76.2	3	2.91	410	8.73	1,230	0.33	46.6	4.74	0.552	0.00768	2.6	1.68	1.701	60.5				
K089050	12.7	0.5	1.307	186.7	3.92	560	0.164	23.36	2.14	0.38	0.00528	1.26	1.02	0.498	17.6				
K089075	19.05	0.75	1.96	280	5.88	840	0.235	33.6	3.35	0.576	0.008	1.64	1.02	0.747	26.4				
K089100	25.4	1	2.618	374	7.84	1,120	0.283	40.64	4.42	0.792	0.0011	1.92	1.02	0.996	35.2				
K089150	38.1	1.5	3.92	560	11.76	1,680	0.381	54.4	6.7	1.15	0.016	2.33	1.02	1.494	52.8				
K089200	50.8	2	4.291	613	12.87	1,839	0.466	66.56	8.95	1.51	0.021	2.6	1.02	1.992	70.4				
K089300	76.2	3	7.13	1,004	21.4	3,012	0.631	88.9	13.4	2.30	0.032	2.9	1.02	3.00	105.6				

(1) = Housed in a motor frame. Typically an aluminum cylinder with 6.35mm (0.250in) thick walls, K032, K044 and K064 mounted to a 152mm x 152mm x 12.5 mm (6in x 6in x 0.5in) aluminum plate K089 mounted to a 203mm x 203mm x 12.5mm (8in x 8in x 0.5in) aluminum plate

Pole Count K032 is 4 K044 is 6 K064 is 8 K089 is 12

A.3.4 Federdatenblatt



Literatur

- Ahn, C. K., Lee, M. C. und Go, S. J. "Development of a biped robot with toes to improve gait pattern". In: *Proceedings / 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003)*. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center, 2003, S. 729–734. ISBN: 0-7803-7759-1. DOI: 10.1109/AIM.2003.1225433.
- [2] ASM. "ASM Specification Aerospace Metals, Inc., Aluminum 7075-T6; 7075-T651, Adresse: http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6". In: (2017).
- [3] Bao, N., Ma, J., Zhang, X. und Zhong, Z. "Structural bionic lightweight design for the stiffened plate of base structure". In: *Proceedings of 2016 7th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 244–247. ISBN: 978-1-4673-8829-0. DOI: 10.1109/ICMAE.2016.7549543.
- [4] Berns, K. und Dillmann, R. *Climbing and Walking Robots: From Biology to Industrial Applications (CLAWAR 2001)*. Wiley, 2001. ISBN: 9781860583650.
- [5] Bevans, J. S. "Biomechanics: A review of foot function in gait". In: *The Foot* 2.2 (1992),
 S. 79–82. ISSN: 09582592. DOI: 10.1016/0958-2592(92)90022-H.
- [6] Blessing, L. T. und Chakrabarti, A. *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer London, 2009. ISBN: 9781848825864. DOI: 10.1007/978-1-84882-587-1.
- [7] Buschmann, T. Simulation and control of biped walking robots: Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2010. 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut, 2011. ISBN: 9783868538045.
- [8] Carson, M. C., Harrington, M. E., Thompson, N., O'Connor, J. J. und Theologis, T. N. "Kinematic analysis of a multi-segment foot model for research and clinical applications: A repeatability analysis". In: *Journal of Biomechanics* 34.10 (2001), S. 1299–1307. ISSN: 00219290. DOI: 10.1016/S0021-9290(01)00101-4.
- [9] Choi, W., Medrano-Cerda, G. A., Caldwell, D. G. und Tsagarakis, N. G. "Design of a variable compliant humanoid foot with a new toe mechanism". In: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Stockholm, Sweden, May 16th-21st. Hrsg. von Okamura, A. und Menciassi, A. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 642–647. ISBN: 978-1-4673-8026-3. DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487189.
- [10] Choi, W., Zhou, C., Medrano-Cerda, G. A., Caldwell, D. G. und Tsagarakis, N. G. "A new foot sole design for humanoids robots based on viscous air damping mechanism". In: 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hrsg. von Burgard, W. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 4498–4503. ISBN: 978-1-4799-9994-1. DOI: 10. 1109/IROS.2015.7354016.
- [11] Devantech. "Devantech Ltd., Industrial Electronic Systems, Ultraschallsensoren, Datenblatt". In: *Attleborough, England* (2017).
- [12] Drehen, Fräsen, Bohren. 8., neu bearb. Aufl. 2008. ISBN: 978-3-540-23458-6.
- [13] ESK Ceramics. "ESK Ceramics GmbH & Co. KG. EKagrip Reibwerterhöhende Scheiben. Datenblatt". In: *Kempten/Deutschland*, (2008).

- [14] Gutekunst. "Gutekunst Federn + Co.KG: Schenkelfeder -T18411R. Datenblatt: https://www.federnshop.co In: *Metzingen, Deutschland* (2017).
- [15] Harmonic Drive. "Harmonic Drive AG, Einbausätze CPL-2A, Datenblatt: http://harmonicdrive.de/de/prod 2a.html". In: *Limburg, Deutschland* (2017).
- [16] Hashimoto, K., Hosobata, T., Sugahara, Y., Mikuriya, Y., Sunazuka, H., Kawase, M., Lim, H. und Takanishi, A. "Development of foot system of biped walking robot capable of maintaining four-point contact". In: *IROS 2005*. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center, 2005, S. 1361–1366. ISBN: 0-7803-8912-3. DOI: 10.1109/IROS.2005.1545185.
- [17] Hashimoto, K., Motohashi, H., Takashima, T., Lim, H.-o. und Takanishi, A. "Shoes-wearable foot mechanism mimicking characteristics of human's foot arch and skin". In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013*. Piscataway, NJ: IEEE, 2013, S. 686–691. ISBN: 978-1-4673-5643-5. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6630647.
- [18] Hashimoto, K., Sugahara, Y., Hayashi, A., Kawase, M., Sawato, T., Endo, N., Ohta, A., Tanaka, C., Lim, H.-o. und Takanishi, A. "New Foot System Adaptable to Convex and Concave Surface". In: 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pitscataway, N.J.: IEEE, 2007, S. 1869–1874. ISBN: 1-4244-0602-1. DOI: 10.1109/R0B0T.2007. 363594.
- [19] Hashimoto, K., Takezaki, Y., Hattori, K., Kondo, H., Takashima, T., Lim, H.-o. und Takanishi, A. "A study of function of foot's medial longitudinal arch using biped humanoid robot". In: 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2010, S. 2206–2211. ISBN: 978-1-4244-6674-0. DOI: 10.1109/IROS.2010. 5650414.
- Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y. und Takenaka, T. "The development of Honda humanoid robot". In: *Proceedings / 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 16 20, 1998, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1998, S. 1321–1326. ISBN: 0-7803-4300-X. DOI: 10.1109/ROBOT.1998. 677288.
- [21] Kajita, S. und Tani, K. "Adaptive gait control of a biped robot based on realtime sensing of the ground profile". In: *Proceedings / 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 22 - 28, 1996, Minneapolis, Minnesota*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1996, S. 570–577. ISBN: 0-7803-2988-0. DOI: 10.1109/R0B0T.1996.503836.
- [22] Kajita, S., Kaneko, K., Morisawa, M., Nakaoka, S. und Hirukawa, H. "ZMP-based Biped Running Enhanced by Toe Springs". In: 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pitscataway, N.J.: IEEE, 2007, S. 3963–3969. ISBN: 1-4244-0602-1. DOI: 10.1109/R0B0T.2007.364087.
- Kaneko, K., Harada, K., Kanehiro, F., Miyamori, G. und Akachi, K. "Humanoid robot HRP-3". In: 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2008, S. 2471–2478. ISBN: 978-1-4244-2057-5. DOI: 10.1109/ IROS.2008.4650604.
- [24] Kang, H.-j., Hashimoto, K., Kondo, H., Hattori, K., Nishikawa, K., Hama, Y., Lim, H.-o., Takanishi, A., Suga, K. und Kato, K. "Realization of biped walking on uneven terrain by new foot mechanism capable of detecting ground surface". In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2010*. Piscataway, NJ: IEEE, 2010, S. 5167–5172. ISBN: 978-1-4244-5038-1. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509348.
- [25] Kapandji, I. A. *The physiology of the joints: Annotated diagrams of the mechanics of the human joints.* Edinburgh: Churchill Livingstone, 1991. ISBN: 0443036187.

- [26] Kerrigan, D., Della Croce, U., Marciello, M. und Riley, P. O. "A refined view of the determinants of gait: Significance of heel rise". In: Archives of Physical Medicine and Rehabilitation 81.8 (2000), S. 1077–1080. ISSN: 00039993. DOI: 10.1053/apmr.2000.6306.
- [27] Krishnan, R. "Selection Criteria for Servo Motor Drives". In: IEEE Transactions on Industry Applications IA-23.2 (1987), S. 270–275. ISSN: 0093-9994. DOI: 10.1109/TIA.1987. 4504902.
- [28] Kristen, K.-H. "Biomechanik des Fussgewolbes. Pra- und postoperative Radiometrie". In: Der Radiologe 47.3 (2007), S. 202, 204–9. ISSN: 0033-832X. DOI: 10.1007/s00117-007-1484-x.
- [29] Li, J., Huang, Q., Zhang, W., Yu, Z. und Li, K. "Flexible foot design for a humanoid robot". In: *IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2008*. Piscataway, NJ: IEEE, 2008, S. 1414–1419. ISBN: 978-1-4244-2502-0. DOI: 10.1109/ICAL.2008.4636375.
- [30] Löffler, K. Dynamik und Regelung einer zweibeinigen Laufmaschine: Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2006. Als Ms. gedr. Bd. 1094. Fortschritt-Berichte / VDI Reihe 8, Mess-, Steuerungsund Regelungstechnik. Düsseldorf: VDI-Verl., 2006. ISBN: 3185094085.
- [31] Lohmeier, S. Design and realization of a humanoid robot for fast and autonomous bipedal locomotion: Entwurf und Realisierung eines humanoiden Roboters für schnelles und autonomes Laufen: Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2010. 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut, 2010. ISBN: 9783868537345.
- [32] Nishiwaki, K., Kagami, S., Kuniyoshi, Y., Inaba, M. und Inoue, H. "Toe joints that enhance bipedal and fullbody motion of humanoid robots". In: *Proceedings / 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2002, S. 3105–3110. ISBN: 0-7803-7272-7. DOI: 10.1109/R0B0T.2002.1013704.
- [33] Parker Bayside. "Parker Hannifin Corporation, Electromechanical and Drives Division, Frameless Kit Motors, Datenblatt". In: (2017).
- [34] Pfaff. "Entwicklung eines modularen Manipulators für den Garten- und Weinbau: Development of a Modular Horti- and Viticultural Manipulator, Dissertation, Lehrstuhl für angewandte Mechanik, Technische Universität München". In: (2015).
- [35] Pratt, D. J. "Mechanisms of shock attenuation via the lower extremity during running". In: *Clinical Biomechanics* 4.1 (1989), S. 51–57. ISSN: 02680033. DOI: 10.1016/0268–0033(89)90068–5.
- [36] Pratt, G. und Manzo, J. "The DARPA Robotics Challenge [Competitions]". In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 20.2 (2013), S. 10–12. ISSN: 1070-9932. DOI: 10.1109/MRA. 2013.2255424.
- [37] Rome, K. "Mechanical properties of the heel pad: Current theory and review of the lite-rature". In: *The Foot* 8.4 (1998), S. 179–185. ISSN: 09582592. DOI: 10.1016/S0958-2592(98)90026-8.
- [38] Schmolz. "Schmolz und Birkenbach Gmbh, Datenblatt AlZnMgCu1,5 EN AW-7075". In: (2017).
- [39] Schraubenlexikon. "www.schrauben-lexikon.de, Werkstoffe-Stähle, Grundlagen Schrauben, Adresse: http://www.schrauben-lexikon.de/td3-werkstoffe-stahl.asp". In: (2017).
- [40] Sharp. "SHARP Devices Europe GmbH, Distanzmess-Sensoren mit PSD, GP2Y0A41SK, Datenblatt". In: *München* (2017).
- [41] Staufenberg. "Evaluierung alternativer Fußtrajektorien für einen humanoiden Laufroboter: Semesterarbteit, Lehrstuhl für angewandte Mechanik, Technische Universität München". In: (2016).

- [42] Tochtermann, W. "Allgemeine Konstruktionsrichtlinien". In: *Maschinenelemente*. Hrsg. von Tochtermann, W. Berlin, Heidelberg und s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 1956, S. 31–42. ISBN: 978-3-662-22136-5. DOI: 10.1007/978-3-662-22135-8{\textunderscore}5.
- [43] VDI-Gesellschaft Entwicklung und Konstruktion Vertrieb. 3-D-Produktmodellierung Technische und organisatorische Voraussetzungen - Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen -Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis. 1.03.2009.
- [44] VUKOBRATOVI, M. und BOROVAC, B. "ZERO-MOMENT POINT ? THIRTY FIVE YEARS OF ITS LIFE". In: International Journal of Humanoid Robotics 01.01 (2004), S. 157–173. ISSN: 0219-8436. DOI: 10.1142/S0219843604000083.
- [45] Whittle, M. W. "Generation and attenuation of transient impulsive forces beneath the foot: A review". In: *Gait & Posture* 10.3 (1999), S. 264–275. ISSN: 09666362. DOI: 10.1016/ S0966-6362(99)00041-7.
- [46] Wiesspeiner, G. "Mikroelektronik 2001 auf dem Weg zum künstlichen Menschen". In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 118.10 (2001), S. 509–516. ISSN: 0932-383X. DOI: 10.1007/BF03157547.
- [47] Yamaguchi, J., Takanishi, A. und Kato, I. "Experimental development of a foot mechanism with shock absorbing material for acquisition of landing surface position information and stabilization of dynamic biped walking". In: *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1995, S. 2892– 2899. ISBN: 0-7803-1965-6. DOI: 10.1109/ROBOT.1995.525694.
- Yamamoto, K., Sugihara, T. und Nakamura, Y. "Toe joint mechanism using parallel fourbar linkage enabling humanlike multiple support at toe pad and toe tip". In: *7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2007*. Piscataway, NJ: IEEE, 2007, S. 410– 415. ISBN: 978-1-4244-1861-9. DOI: 10.1109/ICHR.2007.4813902.
- [49] Yang, H., Shuai, M., Qiu, Z., Wei, H. und Zheng, Q. "A novel design of flexible foot system for humanoid robot". In: 2008 IEEE Conference on Robotics, Automation, and Mechatronics. Piscataway, NJ: IEEE, 2008, S. 824–828. ISBN: 978-1-4244-1675-2. DOI: 10.1109/ RAMECH.2008.4690883.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form – auch auszugsweise – noch nicht im Rahmen einer anderen Prüfung vorgelegt worden.

Garching, 5. Juli 2017

(Unterschrift)