“Untersuchung von Elementarbewegungen des Schreitroboter SimengDolores (Entwurf, Programmierung und Test)“

D I P L O M A R B E I T

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplominformatiker (FH)

eingereicht an der

Fachhochschule Brandenburg

Fachbereich Informatik und Medien

Studiengang Intelligente Systeme

von:

Norman Krause

geb. am 31.03.1973, in Salzwedel

1. Gutachter: Prof. Dr. H. Loose

2. Gutachter: Dipl.-Inform. I. Boersch

Brandenburg, den 30.05.2002

Aufgabenstellung

“Untersuchung von Elementarbewegungen des Schreitroboter SimengDolores
(Entwurf Programmierung und Test)“

Schwerpunkte:

- Bewegungsmuster (Gaits): Definition, Arten, Phasen, Beschreibungsmittel
- Geradlinige Bewegung (Beschreibung, Programmierung, Diskussion):
  - Wave (Tripod) Gait
  - Follow-the-Leader Gait
  - Equal-Phase Gait
- Krummlinige Bewegung (Beschreibung, Programmierung, Diskussion):
  - Turn (Drehen)
  - Swing (Schwenken)
- Experimentelle Untersuchungen:
  - Laufzeiten
  - Abhängigkeiten vom Ladezustand der Akkumulatoren
  - “Geradlinigkeit“
  - Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit
- Dokumentation in Form eines Films

Referat

Autonome Roboter, insbesondere Schreitroboter, gewinnen zunehmend an Bedeutung. Daher ist es notwendig, Entwicklern, Projekteuren und Nutzern die Möglichkeit zu bieten, Kenntnisse auf diesem Gebiet zu erwerben bzw. zu vertiefen, sowie umfangreiche Tests durchzuführen.
Inhalt der vorliegenden Arbeit ist die Planung sowie die Realisierung und Auswertung einiger Laufalgorithmen des Schreitroboters SimengDolores.

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, daß die vorliegende Arbeit von mir selbst und ohne fremde Hilfe verfaßt wurde.
Alle benutzten Quellen sind im Literaturverzeichnis angegeben. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Brandenburg, den 30.05.2002

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung II
Referat III
Selbständigkeitserklärung III
Inhaltsverzeichnis 1
1. Einleitung und Motivation 3
2. SimengDolores 5
2.1 Die mechanischen Bewegungen des Schreitroboters 6
2.2 Berechnung der Position eines Fußes in der Ebene 7
2.3 Kontrolleinheit 8
2.3.1 EyeBot 8
2.4 Sensoren 9
2.4.1 Dehnungsmeßstreifen 9
2.5 Schwerpunktberechnung des Schreitroboters 11
3. Bewegungsmuster 13
3.1 Gangarten 13
3.1.1 Periodische und nichtperiodische Gangarten 13
3.1.1.1 Periodische Gangarten 13
3.1.1.2 Nichtperiodische Gangarten 14
3.1.2 Geländearten 14
3.1.3 Bezeichnungen und Anordnungen der Beine 15
3.1.4 Vorschriften für eine stabile Körperhaltung des Roboters 15
3.2 Geradlinige Bewegungen 16
3.2.1 Wave Gait 16
3.2.1.1 Alternativer Tripod Gait 17
3.2.2 Equal-Phase Gait 19
3.2.3 Follow-the-Leader Gait 21
3.3 Krummlinige Bewegungen 23
3.3.1 Turn 23
3.3.2 Swing 23
4. Programmierung 25
4.1 Herleitung der Schrittweiten 25
4.2 Herangehensweise 25
5. Experimentelle Untersuchungen 29
5.1 Vorbetrachtungen und Versuchsaufbau 29

5.1.1 Versuchsfeld 29
5.1.2 Bestimmung des Ladezustandes der Akkumulatoren 30
5.1.3 Überlegungen zum Versuchsablauf 31
5.1.4 Ergebniserwartung der Versuchsdurchführung 33
5.1.5 Mögliche Fehlerquellen und ihre Vermeidung 34
5.2 Versuchsdurchführung 34
5.2.1 Versuchsdurchführung und Auswertung des Tripod Gaits 36
5.2.2 Versuchsdurchführung und Auswertung des Follow-the-Leader Gaits 41
5.2.3 Versuchsdurchführung und Auswertung des Equal-Phase Gaits 45
5.2.4 Versuchsdurchführung und Auswertung des Swing Left und des Swing Right 50
5.2.5 Versuchsdurchführung und Auswertung des Turn 59
5.2.6 Allgemeines zur Versuchsauswertung 63
6. Zusammenfassung und Ausblick 66
6.1 Zusammenfassung 66
6.2 Ergebnisse 66
6.3 Ausblick 66
Literaturverzeichnis 29
Verzeichnis der Abbildungen 70
Verzeichnis der Tabellen 73
Anhang IV

1. Einleitung und Motivation

“Roboter“ ist eine Bezeichnung für eine Apparatur mit der äußerlichen Gestalt eines Menschen, die menschliche Bewegungen oder auch einfache Hantierungen ausführen kann.
Der Begriff “Roboter“ stammt aus dem tschechischen “robot“ und bedeutet “schwere Arbeit“ oder “Sklavenarbeit“[3].

Welche Entwicklungsstufen von Robotern gibt es bisher?
Auf dem Gebiet der Robotik unterscheidet man drei Entwicklungsstufen. Es gibt Serviceroboter, Industrieroboter und den Personal Robot. Diese unterscheiden sich im Grad der Autonomie, der Aufgabenausführung und in Bezug auf die Anforderungen an die Umwelt.
Zur Zeit handelt es sich bei einem Roboter um eine Maschine, die wenige Aufgaben gut erfüllt und lediglich verschiedenen fest vorgeschriebenen Anweisungen folgt.

- Industrieroboter ersetzen bereits in vielen Industriezweigen den Menschen, da sie im Gegensatz zum Menschen die ihnen zugedachten Aufgaben mit hoher Präzision und stetig ausführen. Sie weisen keine Ermüdungserscheinungen auf. Ein Nachteil von Industrierobotern ist, daß sie meistens einen festen Standort benötigen. Ein Beispiel dafür wäre der Schweißroboter.
- Serviceroboter sind eine Weiterentwicklung der Industrieroboter und bilden die Grundlage für die künftige Generation der Personal Robots. Sie sollen weitestgehend autonom funktionieren. Weiterhin benötigen Serviceroboter nicht mehr unbedingt einen festen Standort. Serviceroboter haben ihren Einsatzort nicht mehr unbedingt in der Industrie, sie sollen dem Menschen Arbeiten abnehmen oder erleichtern. Ein Beispiel für einen Serviceroboter ist der autonome Rasenmäher, der schon länger im Handel erhältlich ist.
- Personal Robots vereinen mehrere Serviceroboter zu einem einzigen Roboter, um viele Aufgaben autonom zu erledigen. Durch interaktive Sprachein- und ausgabe soll er seine Betreiber unterscheiden können. Eine andere Möglichkeit wäre eine Bilderkennung. Sie sollen später zum täglichen Leben gehören, wie heutzutage der PC.

Die meisten Menschen denken bei dem Begriff “Roboter“ an Maschinen, die das Aussehen von Menschen haben, nur wesentlich kräftiger und intelligenter sind.
In der Realität sind die Roboter jedoch ihrem eingegrenzten Aufgabenbereich unabhängig von ihrem Aussehen optimal angepaßt. Daraus läßt sich erkennen, daß es sehr viele Einsatzgebiete für die unterschiedlichen Roboter gibt. Einen Universalroboter, der alles kann, gibt es noch nicht.

Serviceroboter und Personal Robots müssen in der Lage sein, sich fortzubewegen. Eine der bedeutendsten Erfindungen der Menschheit ist mit Sicherheit das Rad. Roboter mit Rädern sind sehr gut geeignet für den Gebrauch auf flachen Laborböden. In einem Gelände mit Bodenunebenheiten und Hindernissen wie in der freien Natur, in Katastrophengebieten oder auf anderen Planeten kommt der Roboter mit Rädern nicht mehr zurecht. Für solches Gelände wurden mehrbeinige Roboter entworfen. Sechs- oder achtbeinige Schreitmaschinen können mehrere Beine heben, um ein Hindernis zu überwinden, und dabei dennoch sicher stehen.

Die Geschichte und die Bestandteile des Schreitroboters “SimengDolores“ werden in Kapitel 2 erläutert. Weiterhin sind dort auch noch einige wichtige Berechnungen aufgeführt.

Einige Betrachtungen zu den möglichen Geländearten erfolgen in Kapitel 3. Ebenso werden dort Stabilitätsbetrachtungen angestellt. Daraus leiten sich dann diverse Stabilitätsvorschriften des Schreitroboters ab. Außerdem werden dort die zu verwendenden unterschiedlichen Gangarten näher betrachtet und erklärt.

Einen Überblick über die Programmierung der einzelnen Gangarten mit einigen Auszügen aus dem Quellcode ist in Kapitel 4 dargestellt und erläutert. Weiterhin wird auf die unterschiedliche Herangehensweise zur Gangartenprogrammierung eingegangen.

Der Test der Programme erfordert genaue Überlegungen zum Versuchsaufbau und zu Details der Versuchsdurchführung. Weiterhin muß genau durchdacht werden, wie und wo eventuelle Fehler auftreten können und wie man sie vermeiden kann. Dieses und die Versuchsdurchführung mit der dazugehörigen Auswertung wird in Kapitel 5 beschrieben.

Eine Zusammenfassung der Arbeit sowie einige Verbesserungsvorschläge zur Konstruktion des Schreitroboters “SimengDolores“ sind im Kapitel 6 aufgeführt. Weiterhin findet man in diesem Kapitel auch einen Ausblick und einige Vorschläge für die zukünftigen Arbeiten mit dem Schreitroboter.

2. SimengDolores

Das Lehrprojekt zur Konstruktion einer Schreitmaschine startete 1999 an der Fachhochschule Brandenburg. Eine Gruppe von Studenten befaßte sich damals mit kinematischen Prinzipien von Beinen, Strukturen von Schreitmechanismen, Gangarten, Sensortechnik und Programmierung des EyeBot[1].
Sie entschieden, daß der Roboter sechs Beine mit jeweils zwei aktiven und zwei passiven Freiheitsgraden sowie eine Symmetrieachse haben sollte. Die Abbildung 2.1 und Abbildung 2.2 zeigen den Schreitroboter.
Im September 2000 war es dann soweit, daß der Roboter die ersten Schritte machte[1].

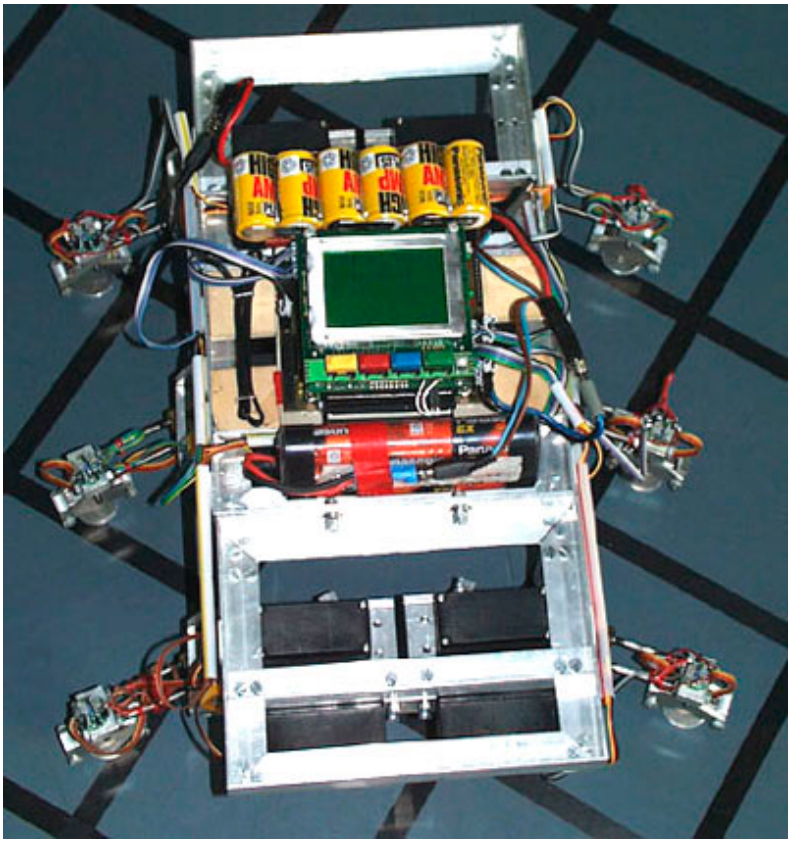


Abbildung 2.1 Foto “SimengDolores“

Benutzte Software

Das Schreiben der Programme wurde mit dem EditPad Classic 3.5.3 vorgenommen, dieses kann man sich von der Seite www.editpadclassic.com herunterladen.
Übersetzt wird ein Programm mit dem gcc – m68k Übersetzer. Mit dem as – m68k wird dann eine für den Roboter lesbare *.hex – Datei erstellt.

Mit dem Tera Term Pro Version 2.3 wird die *.hex - Datei zum Roboter über die serielle Schnittstelle und einem RS 232 Kabel übertragen.

2.1 Die mechanischen Bewegungen des Schreitroboters

Der Schreitroboter “SimengDolores“ ist mit sechs Beinen ausgestattet, die symmetrisch zur Längsachse angebracht sind. Damit ist der Roboter eine grobe Nachbildung eines Reptils oder eines Insekts. Die Beine des Roboters haben zwei aktive und zwei passive Freiheitsgrade. Der Körper des Roboters setzt sich aus drei identisch konstruierten Segmenten zusammen. Jedes Segment besteht aus zwei Beinen, und zu jedem Bein gehören zwei Motoren[1].

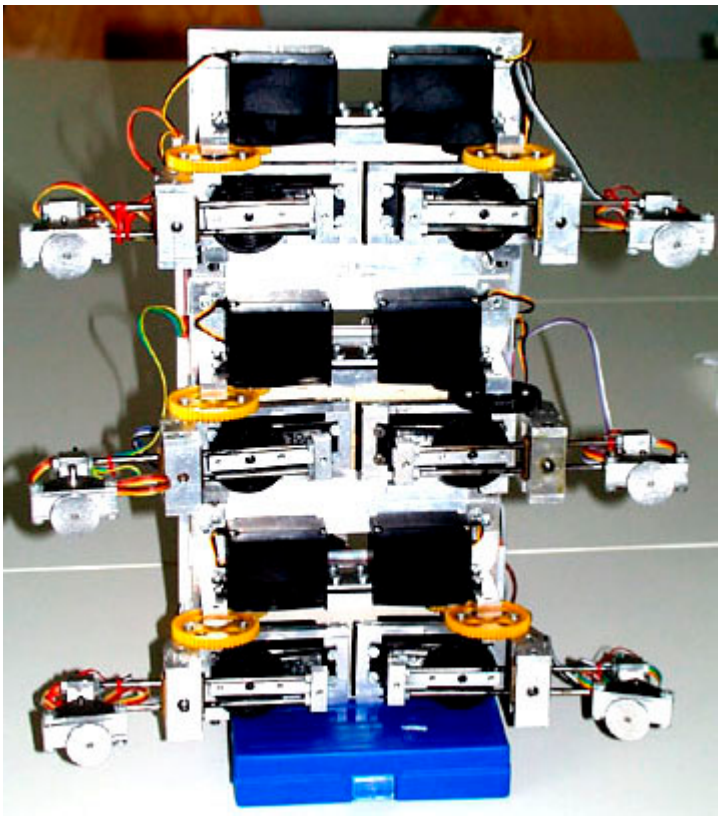


Abbildung 2.2 Ansicht von unten

Die Beinkonstruktionen sind relativ einfach zu bedienen. Der Winkel α (Siehe Abbildung 2.3) wird von einem der zwei Servomotoren eingestellt. Der Winkel α ist für die Beinbewegungen in der Horizontalrichtung verantwortlich. Der zweite Servomotor stellt den Winkel β ein, über den die vertikale Bewegung der Beine erzeugt wird.
Die Füße des Roboters sind am Punkt c in der Abbildung 2.6 entgegen der Längsachse beweglich gelagert. Diese Konstruktion ermöglicht die zwei passiven Freiheitsgrade. Ein aktiver

Freiheitsgrad wird vom Schreitroboter gesteuert. Den passiven Freiheitsgrad kann der Roboter nicht beeinflussen.

2.2 Berechnung der Position eines Fußes in der Ebene

Beim Follow-the-Leader Gait ist es sehr wichtig, die genauen Positionen der Füße zu kennen.

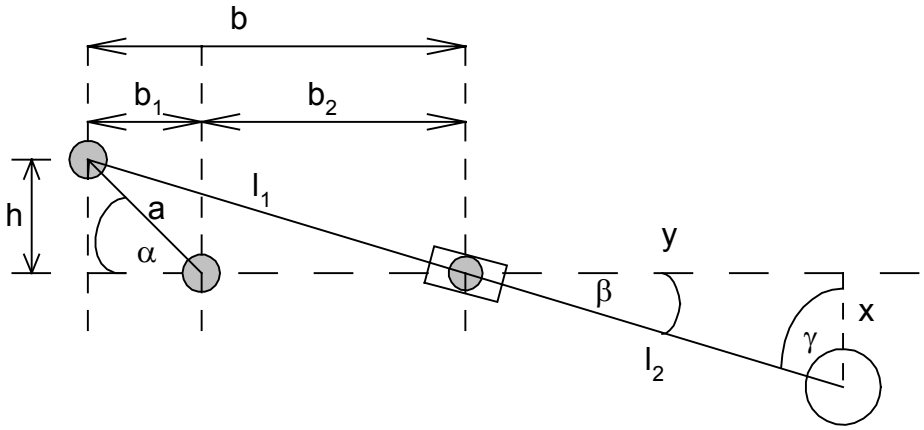


Abbildung 2.3 Bein in X-Y – Ebene [1]

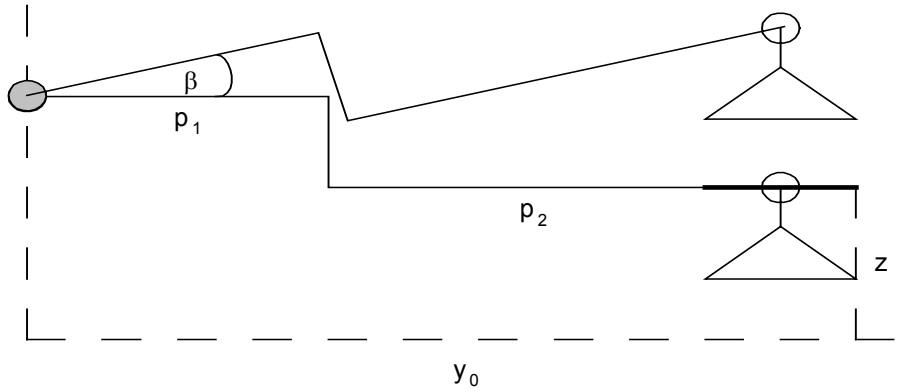


Abbildung 2.4 Bein in Y-Z _ Ebene[1]

Durch die baulichen Gegebenheiten sind folgende Werte gegeben:

$L = l_1 + l_2 = 134$ mm

$a = 41$ mm

$b_2 = 42$ mm

$\alpha =$ einzustellender Winkel am Servomotor

Dazu kommen noch die Koordinaten der Anbringung des Beines an den Roboter.
Die Position eines Fußes läßt sich anhand der Abbildung 2.3 mit folgenden Formeln berechnen:

$h = a * \sin \alpha$ (1)

$b_1 = a * \cos \alpha$ (2)

$l_1^2 = h^2 + (b_1 + b_2)^2$ (3)

$l_2 = L - l_1$ (4)

$$x = \frac{h * l_2}{l_1} \quad (5)$$

$$y = \frac{(b_1 + b_2)}{(l_1 * l_2)} \quad (6)$$

$$\sin \gamma = \frac{y}{l_2} \quad (7)$$

$\beta = 180° - 90° - \gamma$ (8)

Die Formeln 1, 2 und 7 lassen sich von den Definitionen am rechtwinkligen Dreieck ableiten. Der Satz des PYTHAGORAS wird auf die Formel 3 angewendet.

2.3 Kontrolleinheit

Der Schreitroboter erhält seine Spannung über Akkumulatoren. Diese bestehen aus jeweils 6 x 1,2V. Bei dem Schreitroboter werden mindestens zwei verwendet. Ein “2300 Racing Pack“, besteht aus NiCd mit 2,3 Ah, der die Servomotoren mit Spannung versorgt und ein “Voltcraft RC Power Pack“ auch aus NiCd mit 1,5 Ah, der die Betriebsspannung für den EyeBot bereitstellt. Um über eine längere Zeit mit dem Schreitroboter arbeiten zu können, ist es möglich, mehrere miteinander gekoppelte Akkumulatoren zu nutzen.

2.3.1 EyeBot

Der EyeBot ist eine Plattform für die Programmierung von mobilen Robotern mit Rädern, Gehmaschinen oder fliegenden Robotern. Das System enthält einen leistungsfähigen Motorola 68332 Mikrocontroller mit großer Grafik-LCD-Anzeige. RoBIOS ist das Betriebssystem des Eyebot. Der EyeBot wurde entwickelt von Thomas Bräunl [7].

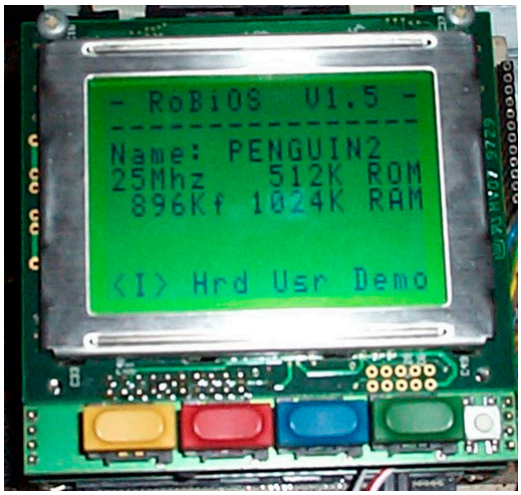


Abbildung 2.5 EyeBot

Die Programmierung des EyeBot's erfolgt in C oder Assembler an einem IBM - PC oder an einer Unix Workstation. Die Programme werden auf den EyeBot über ein serielles Kabel (RS-232) in den RAM oder in den Flash – ROM geladen bzw. dort abgelegt. Der EyeBot wurde noch um ein I/O Board erweitert[1].

2.4 Sensoren

Damit der Roboter in einem rauhen Gelände immer eine stabile Lage hat, hat er in jedem Fuß einen Kraftsensor. Dieser ermöglicht es zu entscheiden, wo er den Fuß plazieren soll.
Weiterhin kann der Roboter mit einer Kamera, Infrarotsensoren und Photowiederständen ausgerüstet werden.

2.4.1 Dehnungsmeßstreifen

Dehnungsmeßstreifen bestehen aus Metall oder aus einem Halbleiter. Da Halbleiter – Dehnungsmeßstreifen einen sehr hohen Preis haben und außerdem sehr temperaturempfindlich sind, werden sie in der Praxis nur sehr selten eingesetzt. Dehnungsmeßstreifen haben sehr unterschiedliche Längen von Meßgittern. Sie haben eine Länge von sechs bis zehn Millimeter. Die elektrischen Widerstände betragen zum Beispiel 120, 350, 600 und 1000 Ohm. Der zulässige Meßstrom liegt bei etwa 10 bis 20 mA.
Was passiert, wenn der Fuß des Schreitroboters den Boden berührt? Der Zapfen a aus Abbildung 2.6 drückt auf ein dünnes Metallplättchen b. Durch diesen Druck biegt sich das Metallplättchen, was zu einer Änderung des elektrischen Widerstandes führt.
Die Änderungen der elektrischen Widerstände von Dehnungsmeßstreifen in Folge der Dehnung des Meßgebers sind sehr klein. Daher werden die elektrischen Widerstände von Deh-

nungsmeßstreifen und deren Änderungen in Brückenschaltungen gemessen. Dafür wird häufig die Wheatstonesche Meßbrücke (Abbildung 2.8) verwendet[5].

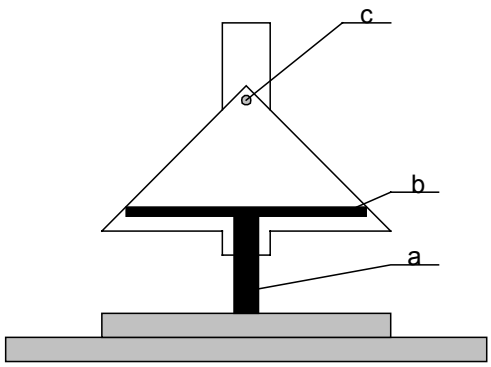


Abbildung 2.6 Fußansicht Zeichnung

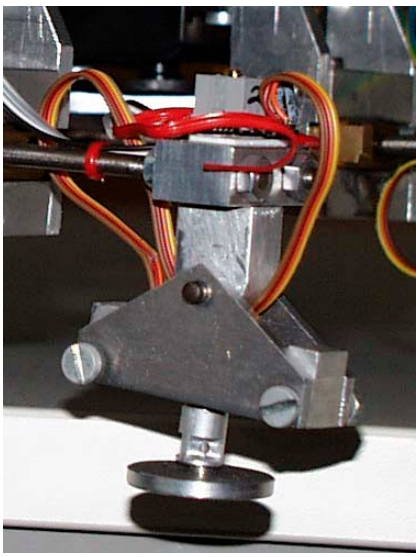


Abbildung 2.7 Fußansicht Foto

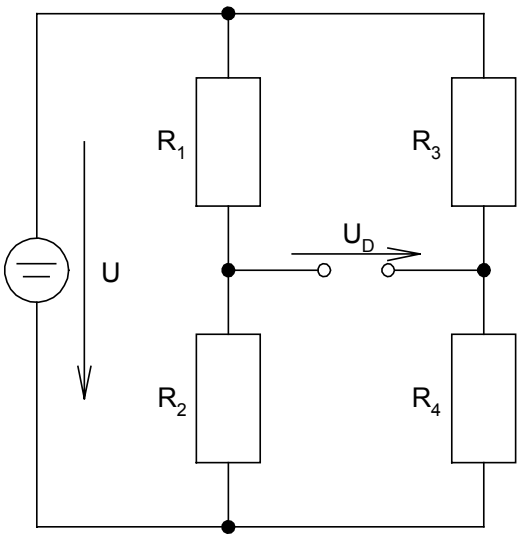


Abbildung 2.8 Wheatstonesche Brückenschaltung für Dehnungsmeßstreifen

Vor der Belastung des Meßobjektes sollte $U_D = 0$ sein, damit die Meßbrücke abgeglichen ist. Benutzt man die Meßschaltung nach Abbildung 2.8 so, daß alle vier Widerstände Dehnungsmeßstreifen sind, dann sind die Meßwiderstände R2 und R3 auf Dehnung und die beiden verbleibenden Meßwiderstände auf Stauchung zu belasten. Das ganze funktioniert auch umgekehrt[6].

2.5 Schwerpunktberechnung des Schreitroboters

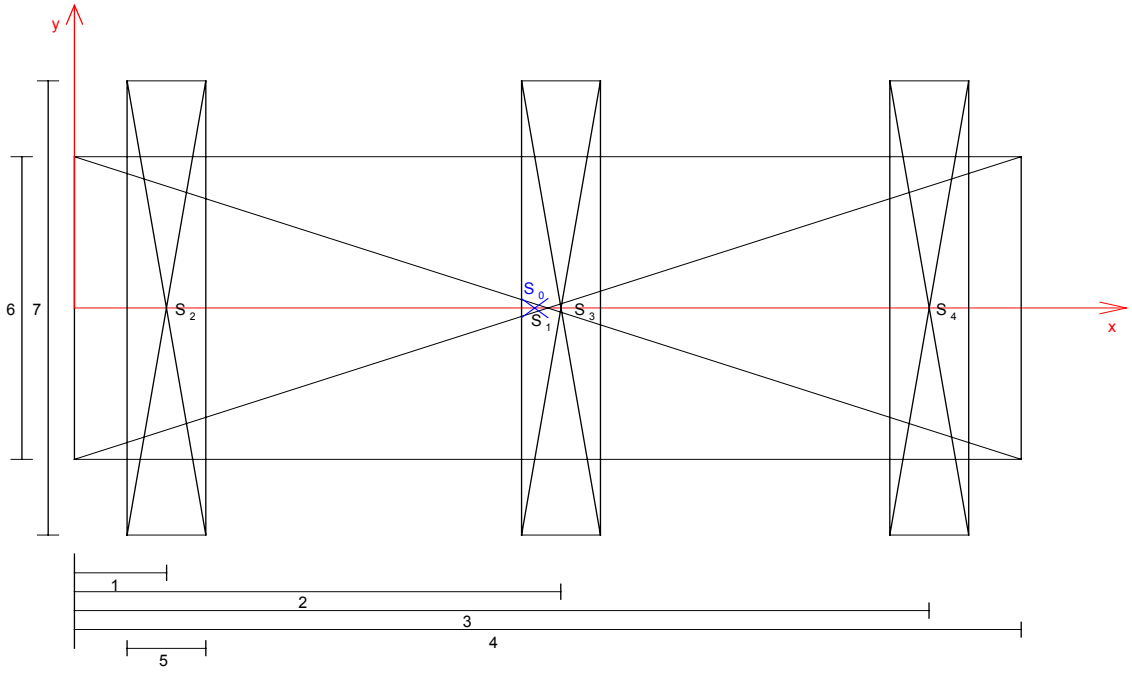


Abbildung 2.9 Skizze zur Berechnung des Schwerpunktes

Zur Berechnung des Schwerpunktes wurden das Board und die Akkumulatoren vernachlässigt.

Schaut man von oben auf den Schreitroboter, erkennt man 4 Rechtecke. Der Schwerpunkt eines Rechteckes befindet sich dort, wo sich die Diagonalen schneiden. Da der Schreitroboter symmetrisch konstruiert wurde, liegen alle Schwerpunkte auf der Symmetrieachse. Zur Ermittlung des Schwerpunktes vom ganzen Roboter, wird der Flächeninhalt jedes einzelnen Rechtecks mit folgender Formel errechnet:

$$A_i = a * b \qquad (9)$$

Danach werden die x – Koordinaten aller Schwerpunkte der Rechtecke ermittelt. Sie sind in der Abbildung 2.9 gekennzeichnet mit S1 bis S4. Anschließend kann mit der Formel 10 der Schwerpunkt S_0 berechnet werden.

$$x_{S_0} = \frac{\sum x_i * A_i}{\sum A_i} \qquad (10)$$

Die folgenden Maße beziehen sich auf die Bemaßung in Abbildung 2.9:

1 = 55 mm

2 = 212,5 mm

3 = 186 mm

4 = 425 mm

5 = 70 mm

6 = 187 mm

7 = 370 mm

Tabelle 2.1 Berechnung des Schwerpunktes S_0

i	A_i	x_i	A_i*x_i
1	79475	212,5	16888437,5
2	25900	55	1424500
3	25900	195	5050500
4	25900	370	9583000
Summe :	157175		32946437,5
Ergebniss :	209,616272		

Der Schwerpunkt S_0 befindet sich auf der Symmetrieachse bei 209,61 mm. Damit ist der Schwerpunkt um 2,88 mm vom Mittelpunkt des Schreitroboters entfernt.

Die vorgenommene Schwerpunktermittlung bezieht sich ausschließlich auf die Ruheposition. Ändert der Roboter die Beinstellungen, erhält man sieben Rechtecke, das heißt, daß sich der Schwerpunkt entsprechend ändert. Der Schwerpunkt liegt dann auch nicht mehr unbedingt auf der Symmetrieachse. Eine fortlaufende Bewegung des Schreitroboters führt darausfolgend zur Verschiebung des Schwerpunktes.

3. Bewegungsmuster

3.1 Gangarten

Eine Gangart setzt sich aus mehreren Bewegungen zusammen. Sie ist das Zusammenspiel der Beinbewegungen und der Bewegung des Rumpfes.
Weiterhin besteht eine Gangart für einen vollständigen Schrittzyklus aus mehreren Beinbewegungssequenzen. Ein Zyklus ist abgeschlossen, wenn alle Beine wieder in der Ausgangsstellung sind. Mit sechs Beinen gibt es viele Gangarten, die einen stabilen Gang des Roboters gewährleisten.
In der Tabelle 3.1 sind einige Gangarten aufgeführt und charakterisiert.

Tabelle 3.1 Charakterisierte Gangarten (Quelle Song und Waldorn)

Gangarten	Stabilität	Geländeart	Implementation	Periodisch
Wave Gait	gut	perfektes	leicht	ja
Equal-Phase Gait	gut	perfektes	leicht	ja
Backward Wave Gait	mittel	perfektes	leicht	ja
Backward Equal Phase Gait	mittel	perfektes	leicht	ja
Dexterous periodic Gait	gut	reelles	mittel	ja
Continiuous Follow the Leader Gait	mittel	reelles	mittel	ja
Discontiniuous Follow tehe Leader Gait	sehr gut	rauhes	schwer	nein
Large Obstacle Gait	mittel	Hindernisse	mittel	nein
Precision Footing Gait	sehr gut	rauhes mit Hindernissen	sehr schwer	nein
Free Gait	gut	rauhes	schwer	nein

Durch die Vielzahl der vorhandenen Gangarten ist es schwer, einige passende auszuwählen. Die Auswahl hängt in erster Linie von der Beschaffenheit des Geländes ab. Als nächstes Auswahlkriterium sollte die Stabilität der jeweiligen Gangart in Betracht gezogen werden. Drittes und letztes Kriterium ist die Geschwindigkeit.

3.1.1 Periodische und nichtperiodische Gangarten

3.1.1.1 Periodische Gangarten

Bei periodischen Gangarten ist der erste Zyklus identisch mit jedem folgenden Zyklus. Es gibt keine Abweichungen im Bewegungsmuster einer Gangart. Dadurch sind periodische Gangarten sehr einfach zu implementieren. Zu den periodischen Gangarten gehören der Wave Gait sowie auch der Equal-Phase Gait. Wenn mehrere komplette Zyklen durchlaufen werden sollen, ist das sehr gut mit Hilfe einer Schleife realisierbar.

3.1.1.2 Nichtperiodische Gangarten

Bei den nichtperiodischen Gangarten ist es eher selten, daß zwei Zyklen identisch sind. Ein Grund dafür ist die Rückkopplung der Sensoren und die Auswertung der Meßwerte. Von der Auswertung der Meßwerte hängt der nächste Schritt ab, den der Schreitroboter macht. Dadurch sind nichtperiodische Gangarten sehr schwer in Computerprogramme zu implementieren. Zu den nichtperiodischen Gangarten gehören der Follow-the-Leader Gait sowie der Free Gait.

3.1.2 Geländearten

Um sich für eine Gangart zu entscheiden, sind der Einsatzort sowie die Beschaffenheit des Einsatzortes zu berücksichtigen. Es gibt drei unterschiedliche Geländeformen:

- das ideale Gelände (perfect terrain)
- das reelle Gelände (fair terrain)
- das rauhe Gelände (rough terrain).

Diese Geländeformen unterscheiden sich durch erlaubte und verbotene Bereiche. Verbotene Bereiche sind als tragende Trittflächen ungeeignet. Sie können vom Programmierer definiert werden, oder in der Natur natürliche, vom Roboter unüberwindbare Hindernisse sein. Die Summe aller Bereiche beschreibt die Schwierigkeit des Geländes. Das einfachste ist das ideale Gelände, welches aber eher selten in der Natur vorliegt. Bei diesem Gelände gibt es keine verbotenen Bereiche. Im reellen Gelände existieren einige von diesen verbotenen Bereichen. Diese können jedoch durch die Maschine leicht umgangen werden. Das rauhe Gelände ist das schwierigste, hier existieren viele verbotene Bereiche. Die erlaubten Bereiche müssen sehr sorgfältig ausgewählt werden. Verbotene Bereich können zum Beispiel Steigungen oder Löcher sein.

Im idealen Gelände sind periodische Laufmuster den nichtperiodischen Laufmustern vorzuziehen, da sie einfacher zu realisieren sind. Ein Optimum an Geschwindigkeit und Stabilität bietet der Wave Gait unter einer Vielzahl der möglichen Muster. Der Equal-Phase Gait ist wie der Wave Gait ein periodisches Muster. Da die periodischen Gangarten interne Parameter zur Steuerung verwenden und damit keine für rauhes Gelände erforderliche Rückkopplung aufweisen, sind hier nichtperiodische Gangarten angebracht. Sie können auf sensorische Signale flexibel reagieren. Hier bietet sich der Follow-the-Leader Gait an, da er die nachfolgenden Beine dort aufsetzt, wo die vorderen Beine bereits waren. Dadurch erreicht er eine hohe Stabilität im rauhen Gelände. Da das Suchen nach festem Untergrund sehr zeitaufwendig sein kann, ist diese Art der Fortbewegung sehr langsam[2].

3.1.3 Bezeichnungen und Anordnungen der Beine

Für das Verständnis der folgenden Kapitel ist es sehr wichtig, sich auf eine einheitliche Bezeichnung der Beine zu einigen. Bei der Betrachtung des Roboters von hinten oder von oben, wie in Abbildung 3.1 dargestellt ist, sind die Beine links mit L1, L2 und L3 durchnumeriert. Auf der rechten Seite haben sie die Bezeichnung R1, R2 und R3. Die Durchnumerierung erfolgt von vorn nach hinten. Befindet sich ein Fuß in der Bewegungsphase, ist er weiß gefüllt. Hat der Fuß jedoch Bodenkontakt und befindet sich somit in der Stützphase, hat er eine schwarze Füllfarbe.

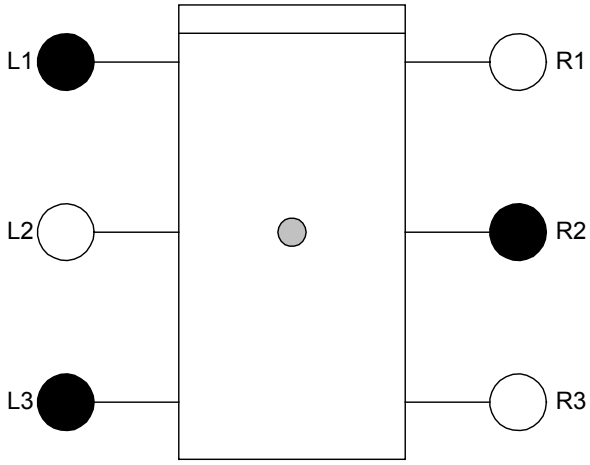


Abbildung 3.1 Beinbezeichnungen des Schreitroboters

3.1.4 Vorschriften für eine stabile Körperhaltung des Roboters

Damit eine stabile Gangart erreicht wird, müssen einige Bedingungen erfüllt sein. Durch die Konstruktion ist es nicht möglich, daß der Roboter auf einem Bein steht. Da das Gewicht des Roboters nicht austariert ist, kann der Roboter auch nicht auf zwei Beinen stehen. Um auf drei Beinen zu stehen, gibt es bei dem Schreitroboter SimengDolores nur drei Möglichkeiten, die in der Abbildung 3.2 zu sehen sind. Alle anderen Beinstellungen, in denen sich drei Beine in der Stützphase befinden, sind nicht erlaubt, da der Schreitroboter sonst das Gleichgewicht verlieren würde.

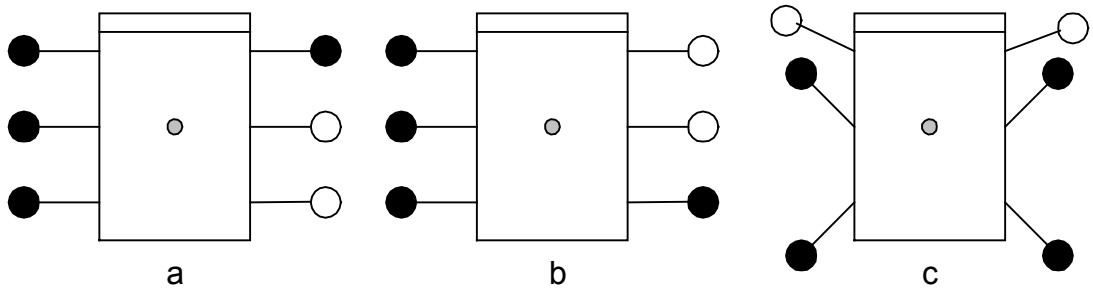


Abbildung 3.2 Aus Stabilitätsgründen erlaubte Beinstellungen

Weiterhin gilt als Vorraussetzung für eine stabile Gangart, daß sich keine zwei direkt nebeneinander liegenden Beine in der Bewegungsphase befinden dürfen. Dabei gibt es eine Ausnahme, die Beine L2 und R2 dürfen sich gleichzeitig in der Luft befinden, wobei sich dann alle verbleibenden Beine in der Stützphase befinden müssen. In der nachfolgenden Abbildung 3.3 sind die aus Stabilitätsgründen nicht erlaubten Beinstellungen aufgezeigt, in denen sich zwei Beine gleichzeitig in der Bewegungsphase befinden.

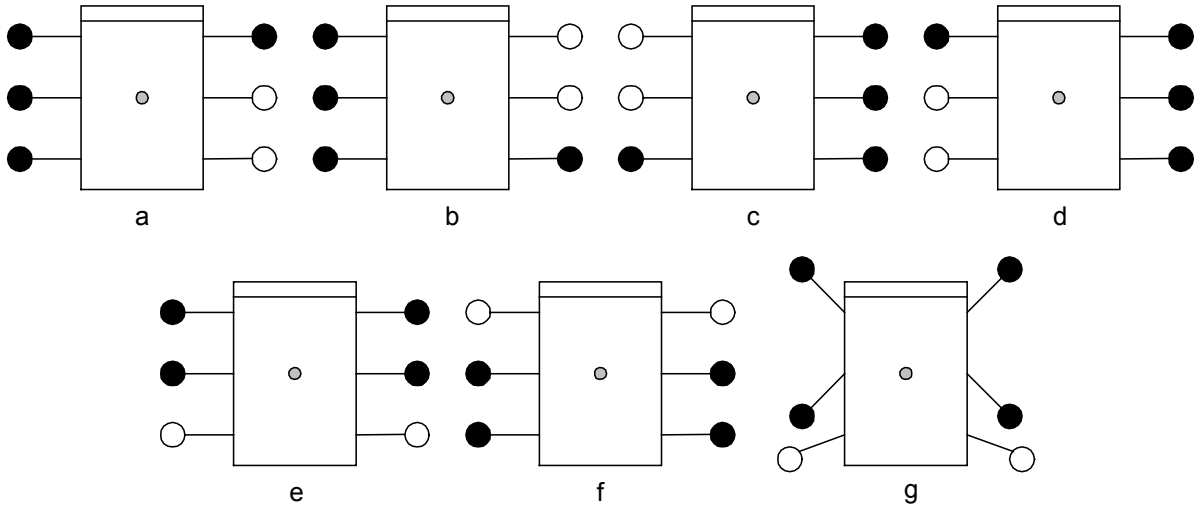


Abbildung 3.3 Aus Stabilitätsgründen nicht erlaubte Beinstellungen

Wenn man sich die Abbildungen 3.2.c und 3.3.g ansieht, fällt auf, daß sich die Beinstellungen sehr ähneln. Aufgrund des Schwerpunktes des Roboters ist die in Abbildung 3.3.g gezeigte Stellung nicht zulässig, da der Schreitroboter kippt. Diese Erkenntnis wurde aufgrund entsprechender Versuche gewonnen.

3.2 Geradlinige Bewegungen

Geradlinige Bewegungen sind Bewegungen, bei denen in einem zweidimensionalen Koordinatensystem eine Koordinate bei Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen stets den selben Wert beibehält.
Die bekanntesten geradlinigen Bewegungen sind :

- “Wave Gait“,
- “Equal-Phase Gait“
- “Follow-the-Leader Gait“.

3.2.1 Wave Gait

Aus Naturbeobachtungen ist bekannt, daß eine solche Gangart mit optimaler Stabilität von vielen vier- wie auch sechsbeinigen Tieren verwendet wird. Durch die optimale Stabilität

wurde der Wave Gait in einer Vielzahl früherer Laufmaschinen verwendet (Sindall 1964, Wilson 1966, Wilson 1967, Okhotsimski und Paltanov 1973, Bessonov und Umnov 1973)[2].
Beim Wave Gait (β = 5/6) befindet sich jeweils nur ein Bein in der Bewegungsphase. Gestartet wird immer mit einem der hinteren Beine, es wird angehoben und vorwärts bewegt. Alle anderen Beine, die sich zu der Zeit in der Stützphase befinden, werden um ein Sechstel der Vorwärtsbewegung eines Zyklusses nach hinten bewegt. Dieser Prozeß wiederholt sich für das nächste Bein der selben Seite. Wenn das vordere Bein diesen Prozeß abgeschlossen hat, wird er auf der anderen Seite ausgeführt, wobei wieder mit dem hinteren Bein begonnen wird.
Der Vorteil dieser Gangart ist die hohe Stabilität, da das Gewicht des Roboters immer auf fünf Beine verteilt ist. Der Nachteil besteht darin, daß der Wave Gait nur ein Sechstel der Geschwindigkeit des alternativen Tripod Gaits hat[2].

3.2.1.1 Alternativer Tripod Gait

In dieser Gangart sind die Beine des Schreitroboters in zwei Gruppen mit je drei Beinen aufgeteilt. Zu jeder Gruppe gehört ein vorderes und ein hinteres Bein der gleichen Seite und das mittlere Bein der gegenüberliegenden Seite.

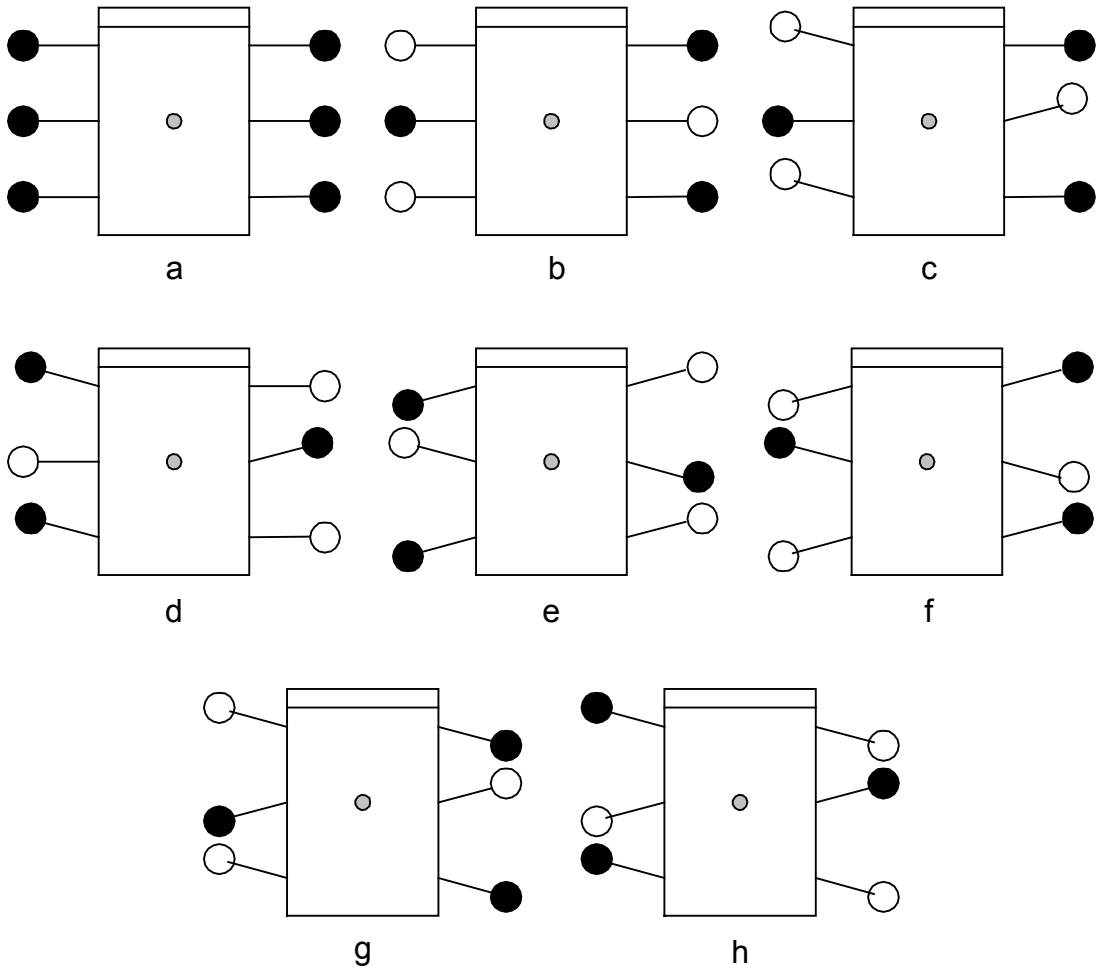


Abbildung 3.4 Schrittfolge beim Tripod Gait

Ein Vorwärtsschritt von einem halben Zyklus startet mit einer Gruppe von Beinen. Die Beine werden angehoben und nach vorne zu einer bestimmten Position bewegt.
Zur gleichen Zeit schwingen die Motoren der Gruppe, die sich in der Stützphase befinden, nach hinten. Damit bewegt sich der Körper des Roboters um die zurückgelegte Strecke nach vorn. Die Beine, die sich in der Bewegungsphase befunden haben, werden aufgesetzt und befinden sich dann in der Stützphase. Damit wird der halbe Zyklus beendet. Jetzt tauschen die Gruppen die Bewegungsabläufe und stellen den zweiten halben Zyklus und damit letztlich den gesamten Zyklus fertig. Das ist die schnellste Gangart, die es bei Schreitrobotern bisher gibt. Während des Schrittes ist das Gewicht des Roboters nur auf drei Beinen verteilt. Findet der Roboter dabei mit einem Fuß keinen festen Untergrund, verliert er das Gleichgewicht und fällt somit um.
In der Abbildung 3.4 erfolgt in jeweils e und g eine Vorwärtsbewegung. Eine Reihenfolge für die Vorwärtsbewegung wäre: a; b; c; d; e; f; g; h; e; f; g; h.
Die nachfolgenden Diagramme sollen zeigen, wie sich die Schrittmuster des Wave Gait bei unterschiedlichem β verhalten. Bei β=½ ist das Schrittmuster des Tripod Gait zu sehen.

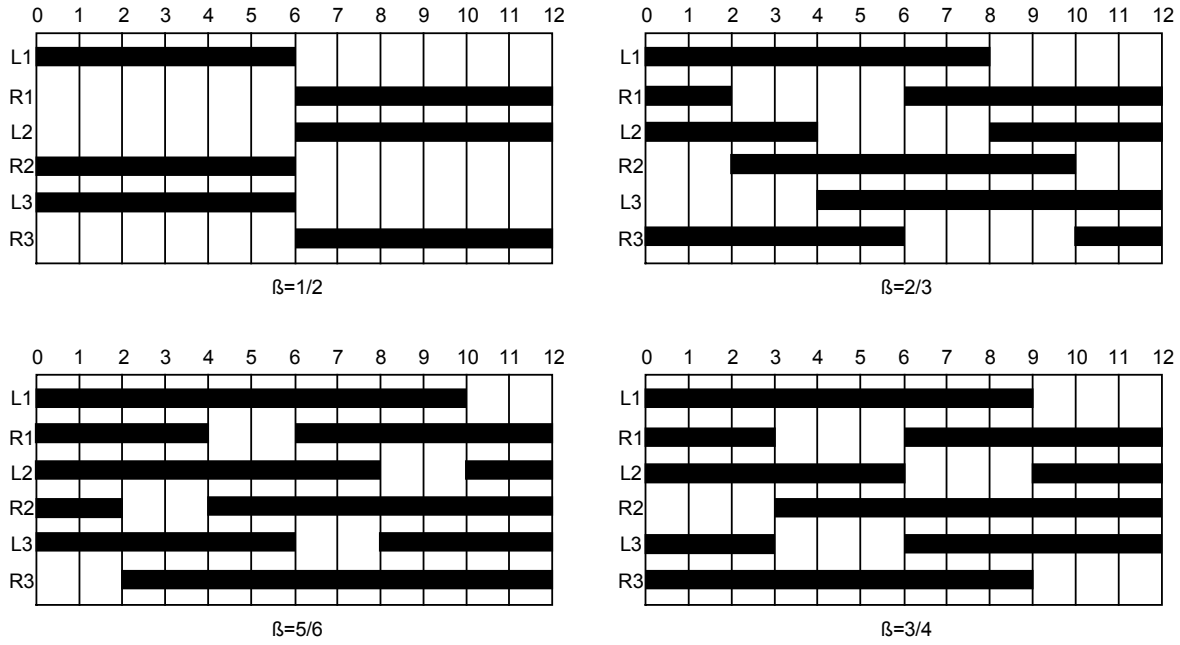


Abbildung 3.5 Gaitdiagramme des Tripod Gait (Quelle Song und Waldorn)

βi =Zeit der Bewegungsphase des Beines i / Zykluszeit des Beines i

3.2.2 Equal-Phase Gait

Es bieten sich zwei Möglichkeiten zur Realisierung des Equal-Phase Gaits. Die erste Möglichkeit liegt in der Gleichverteilung der Ereignisse einer Seite auf die halbe Zykluszeit. Die andere Seite würde symmetrisch in der anderen Hälfte des Zyklus erfolgen. Diese Art wird als half cycle Equal-Phase Gait bezeichnet. Die zweite Möglichkeit ist der full cycle Equal-Phase Gait. Hier werden die Ereignisse gleichmäßig über einen Zyklus verteilt[2].
Die Abbildung 3.7 zeigt den Bewegungsablauf des Equal-Phase Gait. Die Abbildung a ist dabei die allgemeine Ausgangsstellung. Für diese Gangart wird aber eine andere Ausgangsstellung benötigt. Diese ist in der Abbildung 3.7.b zusehen. Die Vorwärtsbewegung in dieser Gangart findet jeweils zwischen den Abbildungen c und d, e und f, g und h, i und j, k und l, sowie m und n statt. Die Abbildung 3.7.o ist identisch mit der Abbildung 3.7.c, bei der der Durchlauf mit der Vorwärtsbewegung von neuem beginnt.

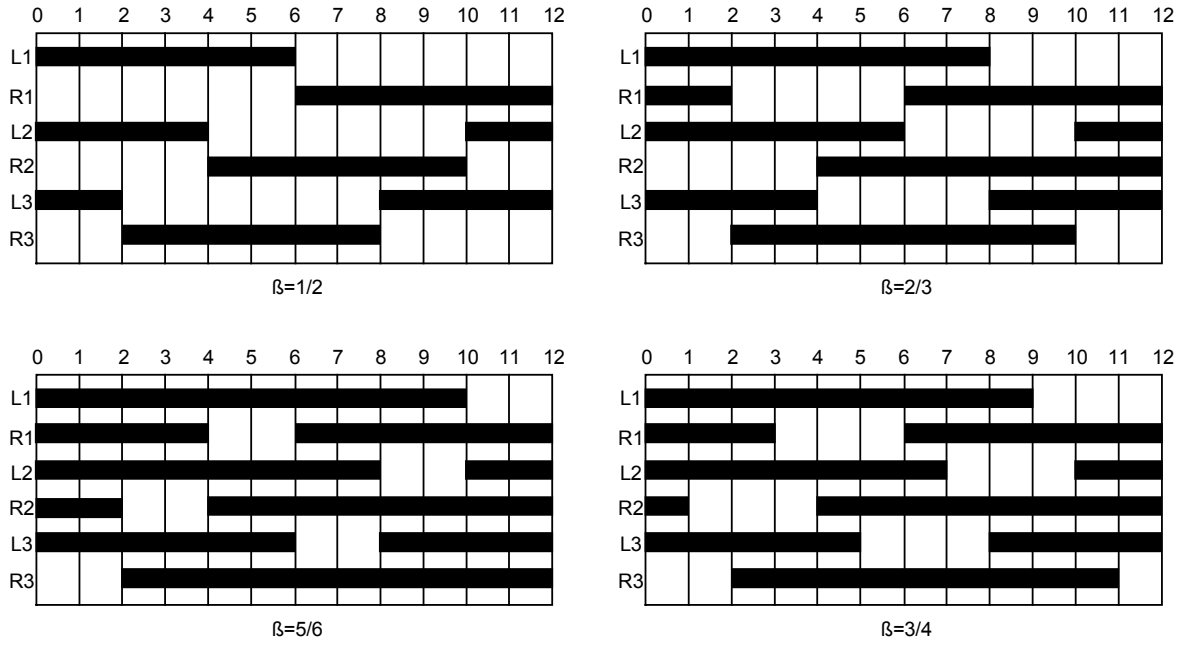


Abbildung 3.6 Gaitdiagramme des Equal-Phase Gait (Quelle Song und Waldorn)

Der Full Cycle Gait mit einem β von 2/3 und der half Cycle Gait mit einem β von 5/6 sind identisch mit dem Wave Gait gleichen Faktors.

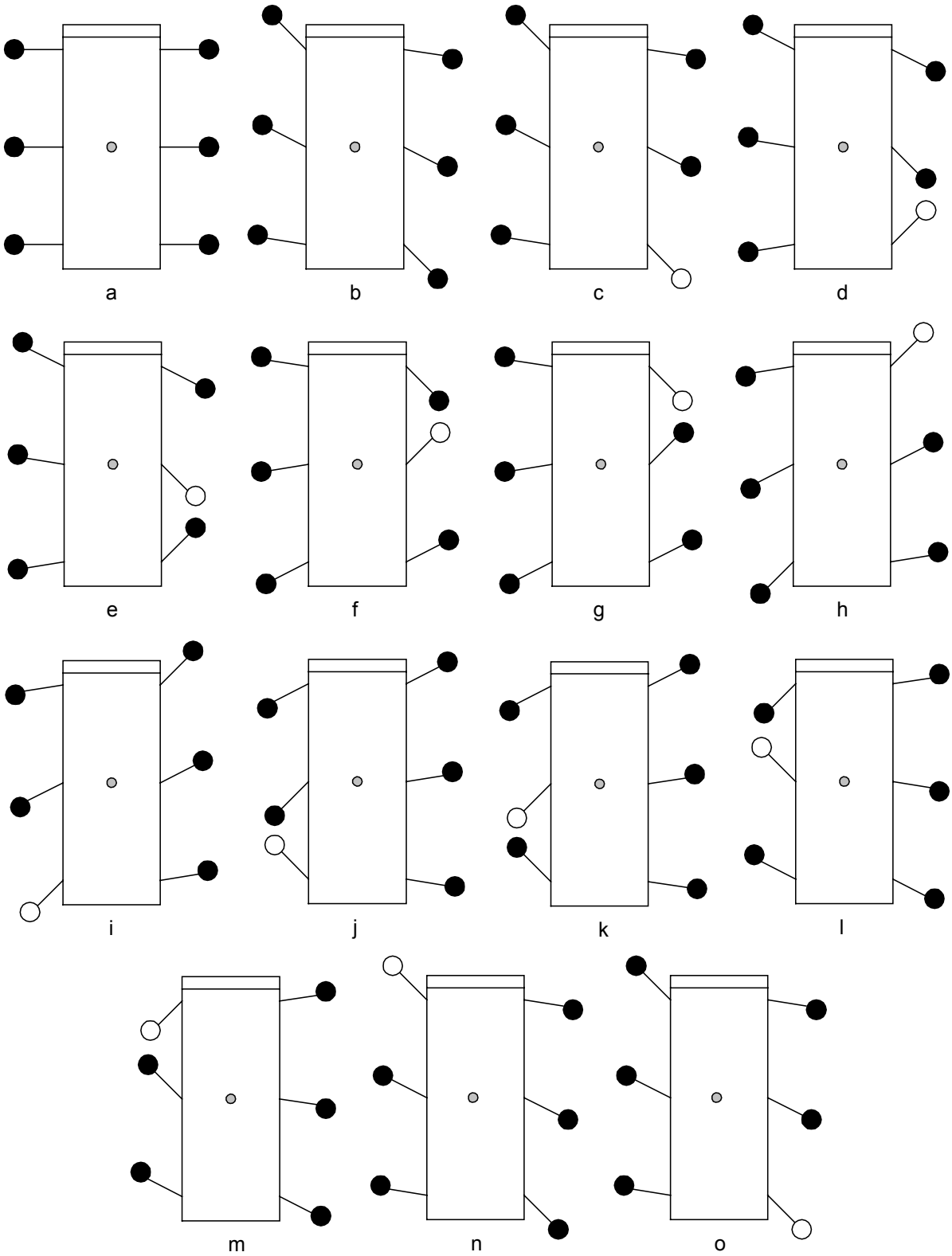


Abbildung 3.7 Bewegungsablauf beim Equal-Phase Gait

3.2.3 Follow-the-Leader Gait

Das Grundprinzip des Follow-the-Leader Gait besteht darin, daß der nachfolgende Fuß den schon bewährten Fußpunkt des vorderen Fußes nutzt. Somit ergibt sich der Vorteil, daß le-

diglich die Fußpunkte für das vordere Beinpaar ausgewählt werden müssen. Die vorderen Fußpunkte gelten dadurch als Referenz für alle nachfolgenden Beinpaare. Durch diese Art der Fortbewegung ist der Follow-the-Leader Gait eine sehr sichere und stabile Gangart im rauhen Gelände[2]. Da nur die vorderen Beine zeitaufwendig nach festem Untergrund suchen und auch finden müssen, gehört diese Gangart zu den nichtperiodischen Gangarten. Diese ist wesentlich schwerer zu implementieren als die periodischen Gangarten. Um festen Untergrund zu finden, ist bei dieser Gangart eine Rückkopplung nötig, die sich durch die Kraftsensoren in den Füßen des Roboters verwirklichen läßt. Die Vorwärtsbewegung des Roboters in dieser Gangart ist sehr langsam. Ein Grund dafür ist die zeitaufwendige Suche nach festem Untergrund für das vordere Beinpaar. Der zweite Grund hängt mit der Definition der Gangart zusammen, da in der Ruhephase des Körpers jedes Bein einzeln bewegt werden muß.

In der Abbildung 3.8 ist zu erkennen, daß beim Follow-the-Leader Gait die eigentliche Vorwärtsbewegung des Körpers erst dann stattfindet, wenn sich alle sechs Beine in der Stützphase befinden. Die Vorwärtsbewegung erfolgt zwischen der Abbildung 3.8.h und der Abbildung 3.8.i. Dadurch, daß sich alle sechs Beine in der Stützphase befinden, ist diese Gangart sehr stabil.

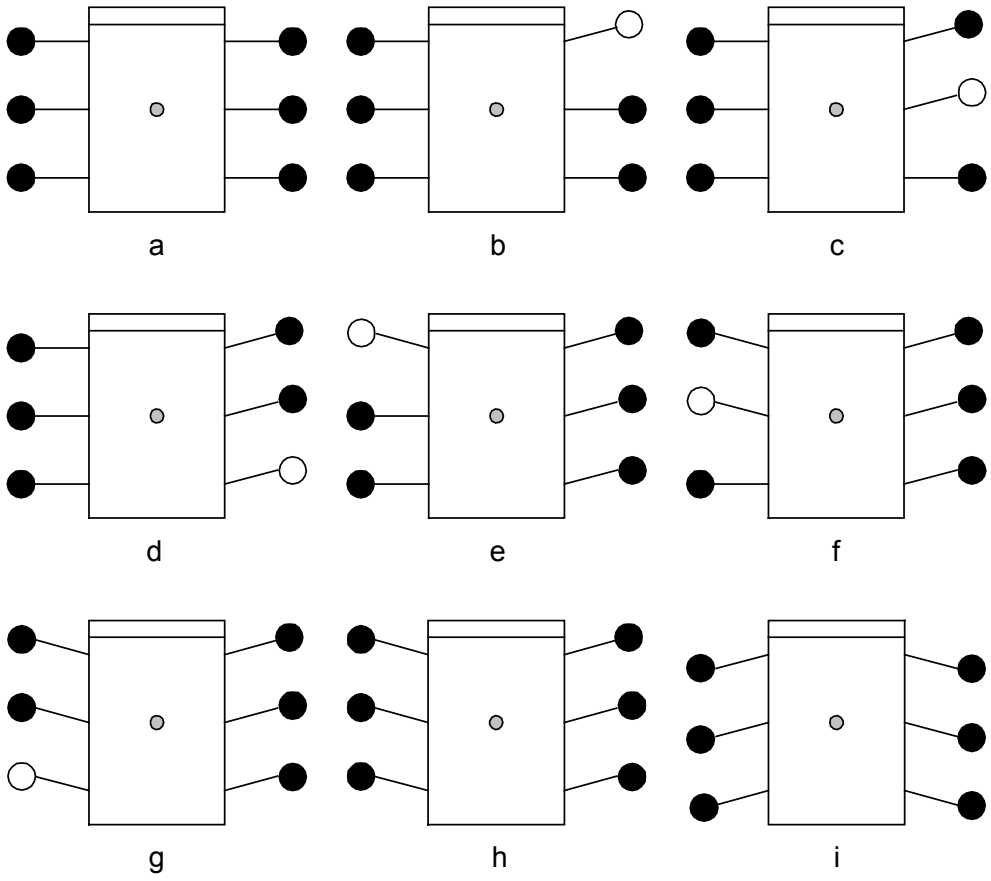


Abbildung 3.8 Bewegungsablauf des Follow-the-Leader Gaits

3.3 Krummlinige Bewegungen

Krummlinige Bewegungen sind Bewegungen, bei denen in einem zweidimensionalen Koordinatensystem beide Koordinaten bei Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen ihren Wert ändern müssen. Eine Ausnahme ist das Drehen auf der Stelle, bei dem sich die Koordinaten des Mittelpunktes des Roboters nicht ändern dürfen.
Zu den krummlinigen Bewegungen zählt das Drehen auf der Stelle (Turn), sowie Bewegungsabläufe, die einen Kurvenverlauf rechtsherum wie auch linksherum haben (Swing).

3.3.1 Turn

Als Turn wird der Bewegungsablauf bezeichnet, bei dem sich der Mittelpunkt des Roboters im Koordinatensystem nicht verändert.

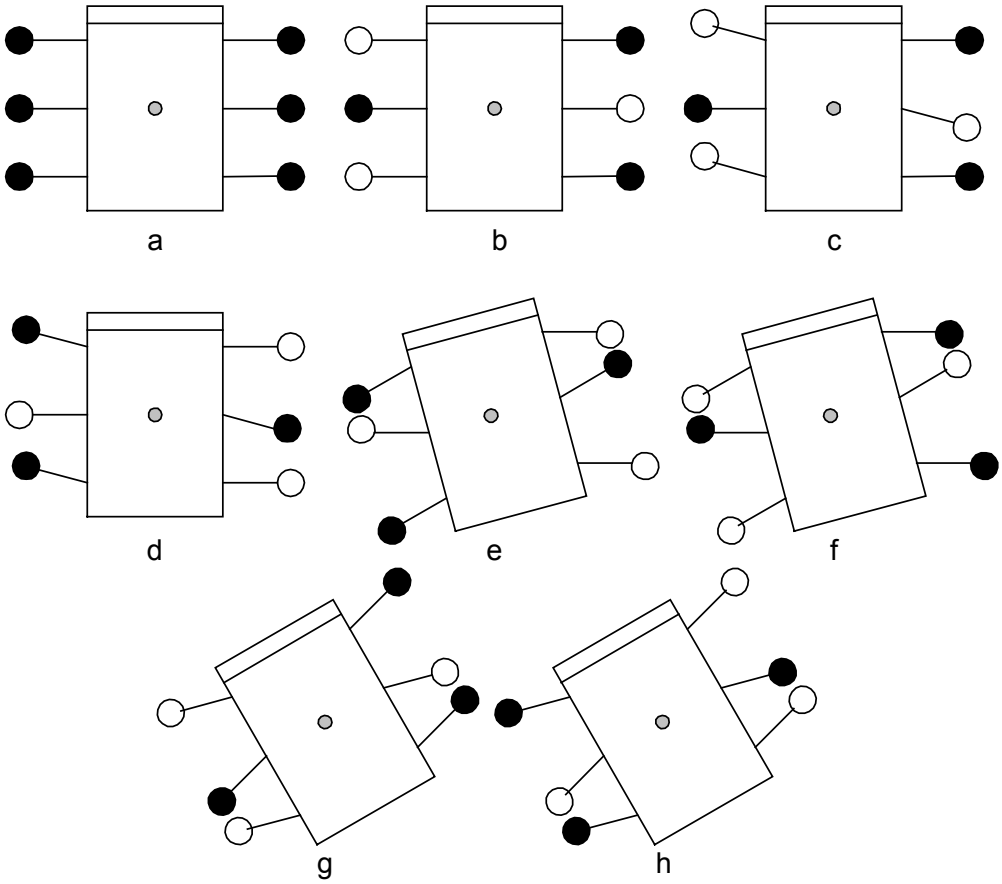


Abbildung 3.9 Bewegungsablauf beim Turn

3.3.2 Swing

Swing sind Bewegungsabläufe, die bei einer Vor- oder bei einer Rückwärtsbewegung einen positiven oder negativen Radius beschreiben. Das heißt, daß die eine Seite des Körpers

einen geringeren Weg zurücklegt als die andere Seite. Um einen Kurvenverlauf in die andere Richtung zu erzeugen, werden nur die Werte der Beinbewegungen getauscht.

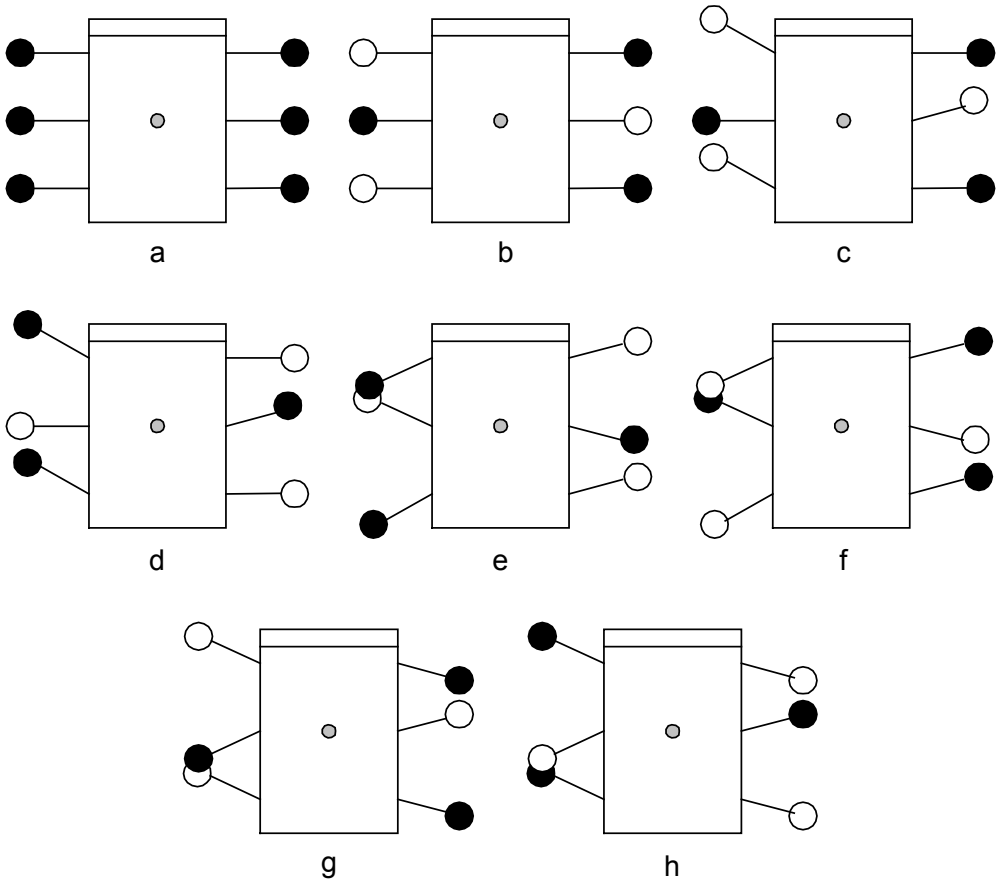


Abbildung 3.10 Bewegungsablauf beim Swing mit Tripod Gait als Gangart

Ein Swing läßt sich auch mit anderen Bewegungsmustern, als nur dem Tripod Gait, erzeugen. Das Grundprinzip entspricht dem des Swing mit dem Tripod Gait. In der Stemmphase wird auf der einen Seite des Rumpfes ein anderer Weg zurück gelegt, als auf der anderen Seite.

4. Programmierung

4.1 Herleitung der Schrittweiten

Die Servomotoren des Schreitroboters haben einen Aktionsradius von 180 Grad. Mit Hilfe des Eyebots lassen sich diese 180 Grad in zweiunddreißig Schritten ansteuern. Zwischen den einzelnen Schritten besteht damit eine Differenz von acht, die mit zweiunddreißig multipliziert 256 ergibt. Der Quotient wiederum aus 256 und 180 ergibt einen Wert von 1,422, der nachfolgend und auch im Quellcode FAKTOR genannt wird.
Die Nullstellung des Schreitroboters soll in der Horizontalen und in der Vertikalen bei ca. neunzig Grad liegen. Dadurch hat man einen Ausgangspunkt. Soll der Roboter die Beine nach vorn bewegen, benötigt man einen positiven Wert, für eine Rückwärtsbewegung jedoch einen negativen Wert.
Um auf die einzelnen Schrittweiten zu kommen, ist es notwendig Zahlen zu finden, die mit dem Faktor multipliziert werden und das gewünschte Ergebnis haben.
Eine viertel Schrittweite ist dreißig, diese durch den FAKTOR dividiert, ergibt ein Ergebnis von 21,09. Nutzt man diese Herangehensweise auch für eine halbe und eine dreiviertel Schrittweite, erhält man 42,19 für die halbe Schrittweite und 63,28 für die dreiviertel Schrittweite. Diese drei Zahlen werden abgerundet auf 21, 42 und 63. Somit ist eine viertel Schrittweite von der Nullstellung aus 21 * FAKTOR. Diese Schrittweiten wurden bei allen Gangarten außer dem Equal-Phase-Gait genutzt.
Beim Equal-Phase-Gait wurden die sechs benötigten Werte in einer Liste angelegt:

- kleine Schrittweite : 30, 18, 6, -6, -18, -30
- mittlere Schrittweite: 50, 30, 10, -10, -30, -50
- große Schrittweite: 70, 42, 14, -14, -42, -70

Ein Auszug aus dem Quellcode:

```
#define FAKTOR              256/180
stroke = 63*FAKTOR, stroke1 = 42*FAKTOR, stroke2 = 21*FAKTOR;
const int FEET_POS6[] = {70, 42, 14, -14, -42, -70};
```

4.2 Herangehensweise

Da die Vorüberlegungen zur Versuchsdurchführung abgeschlossen waren, fehlten noch die Programme der einzelnen Gangarten für den Schreitroboter.
Als erstes kamen die Überlegungen über eine Herangehensweise an das Programmieren. Da in den Abbildungen 3.7 bis 3.10 die Abläufe einer Gangart schon in ihrer Abfolge dargestellt sind, könnte man Schritt für Schritt stur programmieren. Um sich mit dem Schreitroboter

vertraut zu machen, ist dieses eine Möglichkeit. Die zweite Möglichkeit besteht darin, sich wiederholende Programmteile in Funktionen zu schreiben. Funktionen haben den Vorteil, daß sie Quelltext sparen und das Programm übersichtlicher wird. Diese Funktionen können dann an den benötigten Stellen beliebig oft aufgerufen werden. Beim Vergleich der erwähnten Abbildungen ist zu erkennen, daß der Tripod Gait, der Swing Left und der Swing Right sowie das Turn nach dem gleichen Grundprinzip arbeiten. Somit ist das Heben und Senken der Beine ideal geeignet für eine Auslagerung in eine Funktion.

```
void heben1()
/*Heben von L1,L3,R2 */
{
        liftleg(L,0,lift);              /*heben des Beines links vorn*/
        liftleg(R,1,lift);              /*heben des Beines rechts in der Mitte*/
        liftleg(L,2,lift);              /*heben des Beines links hinten*/
        OSWait(MINWAIT);                /*eine erzwungene Pause*/
}

void heben2()
/*Heben von R1,R3,L2 */
{
        liftleg(R,0,lift);              /*heben des Beines rechts vorn*/
        liftleg(L,1,lift);              /*heben des Beines links in der Mitte*/
        liftleg(R,2,lift);              /*heben des Beines rechts hinten*/
        OSWait(MINWAIT);                /*eine erzwungene Pause*/
}
void schwenkenwave1()
/*Schwenken von L1,L3,R2 */
{
        swingleg(L,0,-stroke);          /*schwenkt das linke vordere Bein*/
        swingleg(R,1,-stroke);          /*schwenkt das rechte mittlere Bein*/
        swingleg(L,2,-stroke);          /*schwenkt das linke hintere Bein*/
        OSWait(MINWAIT);                /*eine erzwungene Pause*/
}

void schwenkenwave2()
/*Schwenken von R1,R3,L2 */
{
```

```
        swingleg(R,0,-stroke);      /*schwenkt das rechte vordere Bein*/
        swingleg(L,1,-stroke);      /*schwenkt das linke mittlere Bein*/
        swingleg(R,2,-stroke);      /*schwenkt das rechte hintere Bein*/
        OSWait(MINWAIT);            /*eine erzwungene Pause*/
}

void senken1()
/*Senken von L1,L3,R2 */
{
        liftleg(L,0,0);             /*senkt das vordere linke Bein wieder auf den Boden*/
        liftleg(R,1,0);             /*senkt das mittlere rechte Bein wieder auf den Boden*/
        liftleg(L,2,0);             /*senkt das hintere linke Bein wieder auf den Boden*/
        OSWait(MINWAIT);            /*eine erzwungene Pause*/
}

void senken2()
/*Senken von R1,R3,L2 */
{
        liftleg(R,0,0);             /*senkt das vordere rechte Bein wieder auf den Boden*/
        liftleg(L,1,0);             /*senkt das mittlere linke Bein wieder auf den Boden*/
        liftleg(R,2,0);             /*senkt das hintere rechte Bein wieder auf den Boden*/
        OSWait(MINWAIT);            /*eine erzwungene Pause*/
}
```

Gestartet wird das Roboterprogramm in der Funktion “main“. Dort wird als erstes die Funktion initServos(); aufgerufen, um die Servomotoren zu initialisieren. Die Funktion initialize(); wird als zweites aufgerufen, um die Servomotoren in eine Nullstellung zu bringen. Als drittes wird die Funktion MainMenu(); aufgerufen. Beim Ausführen dieser Funktion erscheint dann auf dem Display vom EyeBot ein Auswahlmenü. Zur Auswahl stehen die geradlinigen (Gaits) und krummlingen (Kurven) Gangarten. Wählt man die geradlinigen Gangarten, öffnet sich ein neues Menü. Dort kann man dann zwischen den drei geradlinigen Gangarten wählen. Wählt man den Equal-Phase Gait, geht der Roboter erst in die Ausgangsstellung. Danach kann die Gangart mittels nochmaligen Knopfdruck gestartet werden.
Entscheidet man sich für die krummlinigen Gangarten, erscheint im Menü die Auswahl zwischen Swing Left, Swing Right und Turn.

Hat man sich entschieden, die Arbeit mit dem Schreitroboter zu beenden, kommt ein Sprung in die Funktion main. Dort werden die Servomotoren wieder in eine Nullstellung gebracht und dann abgeschaltet. Im Anhang A4 befinden sich der kommentierte Quellcode.

5. Experimentelle Untersuchungen

5.1 Vorbetrachtungen und Versuchsaufbau

5.1.1 Versuchsfeld

Da die Laufprogramme auf ihre Geradlinigkeit, ihre Zeitabhängigkeit und auf das Laufverhalten in Abhängigkeit vom Ladezustand der Akkumulatoren getestet werden sollten, mußte ein entsprechend geeigneter Versuchsaufbau gewählt werden. Das Ergebnis dieser Überlegungen ist ein eingerahmtes Feld von zwei mal zwei Metern. Dieses Feld wurde auf dem Fußboden des Labors errichtet. Allein das Feld reicht nicht aus, um genaue Aussagen über die Geradlinigkeit zu treffen. Deshalb wurde das Versuchsfeld weiterhin durch Einbringen eines Rasters unterteilt. Die Abstände zwischen den Rasterlinien betragen jeweils fünfzehn Zentimeter. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

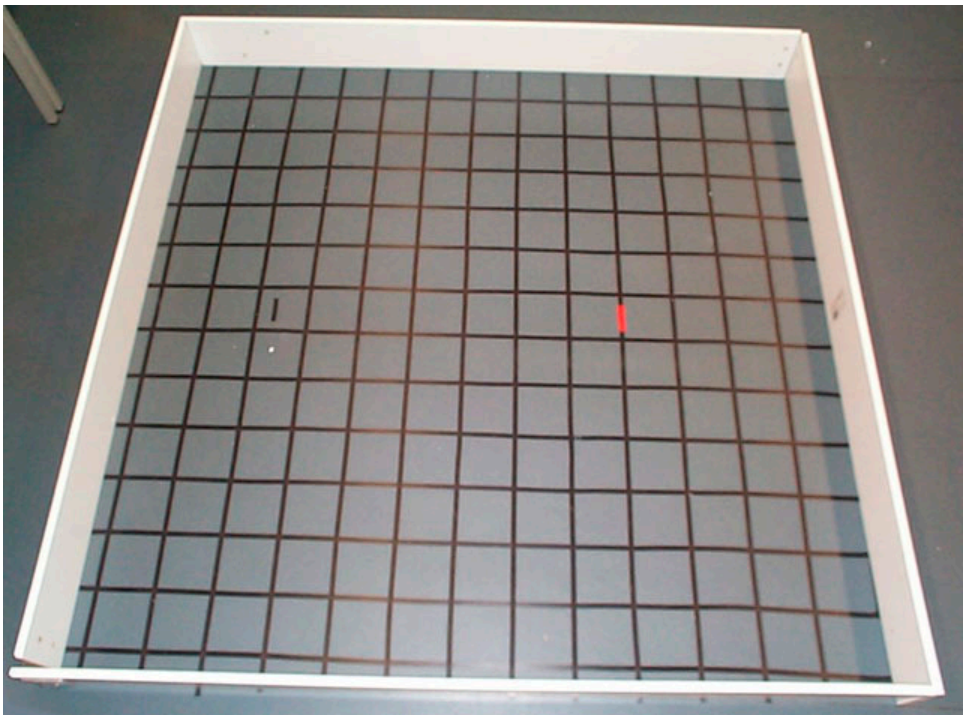


Abbildung 5.1 Versuchsgitter

Da es sich hier um einen ebenen Laborboden handelt, kann man davon ausgehen, daß es sich bei diesem Versuchsaufbau um ein sogenanntes “ideales Gelände“ handelt.

5.1.2 Bestimmung des Ladezustandes der Akkumulatoren

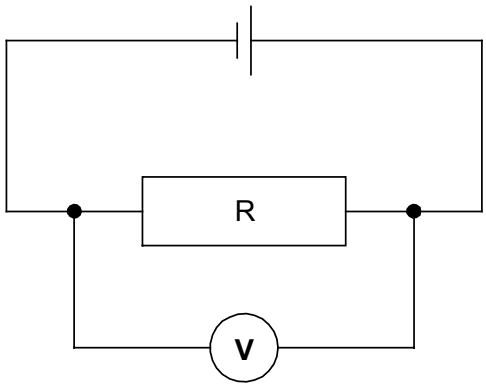


Abbildung 5.2 Schaltbild zum Messen des Ladezustandes der Akkumulatoren

Bei den Tests wurde festgestellt, daß das Laufverhalten und die Geradlinigkeit einer Gangart des Schreitroboters sehr stark abhängig vom Ladezustand der Akkumulatoren ist. Die Bewegungsabläufe entsprachen bei niedriger Spannung der Akkumulatoren nicht mehr der Programmierung. Um etwas über diese Abhängigkeit zu erfahren, wurden Ladezustände der Akkumulatoren festgelegt. Akkumulatoren, die direkt von der Ladestation kamen, wurden als komplett geladen betrachtet und hatten eine Spannung von 6,1 V. Mit den komplett geladenen Akkumulatoren wurden solange Versuche gefahren, bis die Akkumulatorspannung unter einen Wert von 5,9 V sank. Unterschritt die Spannung einen Wert von 5,45 V, wurden sie als leer betrachtet. Ab einer Spannung von unter 5,2 V war eine deutliche Vorwärtsbewegung des Schreitroboters nicht mehr auszumachen. Die Schaltung, die in Abbildung 5.2 dargestellt ist, könnte zum Messen des Ladezustandes dienen. Der Widerstand R hat einen Wert von 2,35 OHM.

Die Größe des Wiederstandes errechnet sich mittels der folgenden Formel:

$$R = \frac{U}{I} \qquad (11)$$

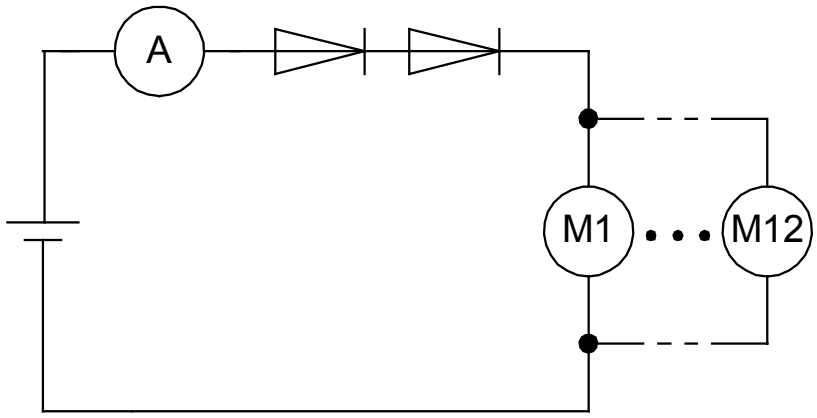


Abbildung 5.3 Strommessungsschaltbild

Die Spannung des Akkumulators ist mit 7,2 V gegeben. Der dazugehörige Strom wurde, wie in Abbildung 5.3 zu sehen ist, mit 2,83 A gemessen. Bei der Messung wurde darauf geachtet, daß alle Motoren auch belastet wurden. Durch diese Werte errechnet sich der benötigte Widerstand von 2,55 OHM. Da es einen Widerstand dieser Größenordnung nicht gibt, müssen mehrere Widerstände in einer Parallelschaltung zu einem Widerstand zusammengefaßt werden. Weiterhin wird von dem benötigten Widerstand, der Leitungswiderstand der Meßleitungen abgezogen.
Diese Herangehensweise ist sehr aufwendig, da man die Akkumulatoren immer wieder an die Meßschaltung anschließen muß.
Eine zweite Möglichkeit ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Hier besteht der Vorteil, daß eine kontinuierliche Spannungsanzeige vorhanden ist. Der Nachteil ist, daß das Meßgerät vom Schreitroboter getragen werden muß, der somit durch das zusätzliche Gewicht mehr belastet wird.

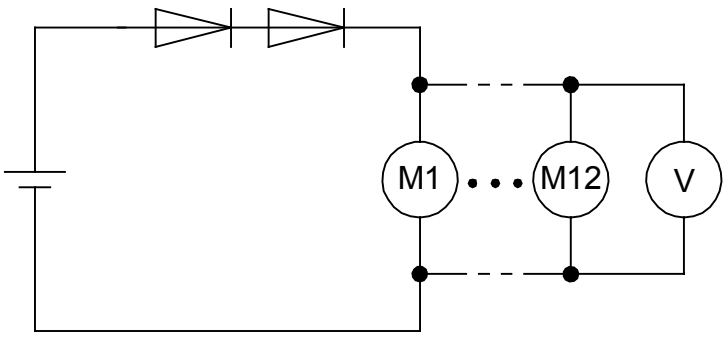


Abbildung 5.4 Spannungsmeßschaltung

5.1.3 Überlegungen zum Versuchsablauf

Zur Durchführung der Versuche ergaben sich zwei Möglichkeiten: Zum einen den Roboter eine bestimmte Zeit laufen zu lassen und den zurückgelegten Weg zu messen, oder den Roboter einen bestimmten Weg zurücklegen lassen und dann die Zeit zu stoppen, die er für den Weg benötigt. Um die Ergebnisse auszuwerten, sollte die benötigte Zeit oder der zurückgelegte Weg in allen Gangarten einheitlich sein. Während der Tests wurde festgestellt, daß es günstiger ist, den Schreitroboter einen bestimmten Weg laufen zulassen und die Zeit zu stoppen, da bei vorgegebener Zeit die zurückgelegten Strecken große Differenzen aufwiesen. So wurde im Wave-Gait innerhalb von dreißig Sekunden ein Weg von fast einem Meter zurückgelegt, während im Follow-the-Leader Gait in der selben Zeit nur ca. zwanzig Zentimeter und im Equal-Phase Gait eine noch geringere Strecke zurück gelegt wurde.

Durch die Erweiterung der Zeit auf sechzig Sekunden, ist das Versuchsfeld für den Tripod Gait zu klein geworden.

Aufgrund der vorgenannten Tests wurde hinsichtlich des Versuchsaufbaus entschieden, bei der Vergleichsmessung von einer zurückzulegenden Strecke von einem Meter auszugehen und die dafür benötigte Zeit zu messen.

Da bei diesen Versuchen auch die Geradlinigkeit der Gangarten überprüft werden sollte, wurden die im Versuchsfeld eingebrachten Rasterlininien zur Prüfung und Messung verwendet. Entsprechende Messungen wurden nach Beendigung eines jeden Versuches vorgenommen.

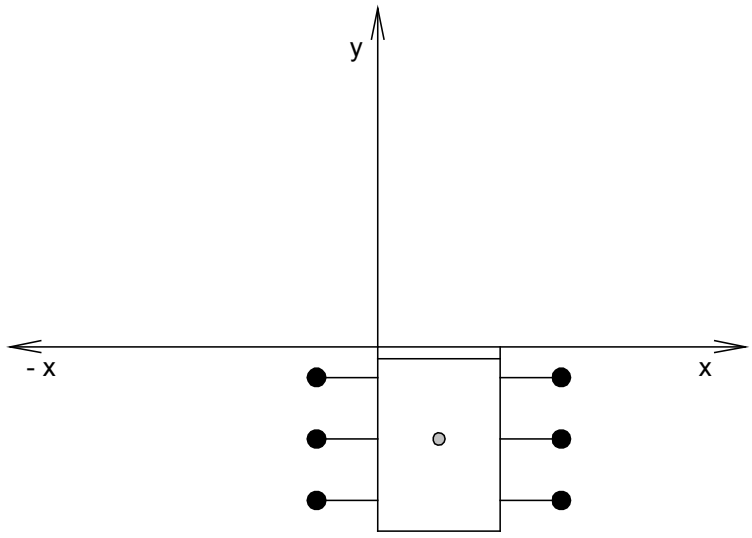


Abbildung 5.5 Ausgangsstellung beim Messen von Abweichungen

Wie in Abbildung 5.5 zu sehen ist, startete der Schreitroboter am Koordinatenursprung und mußte von dort aus die vorgegebene Strecke von einem Meter zurücklegen. Nachdem die vorgegebene Strecke zurückgelegt war, wurde der positive oder negative Abstand von der x-Achse gemessen. Darausfolgend ergeben sich zwei Seitenlängen eines rechtwinkligen Dreiecks.

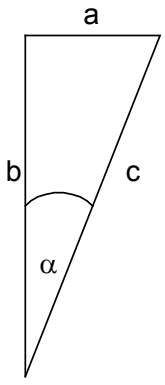


Abbildung 5.6 Skizze zur Berechnung der Abweichung

Mittels der zwei Seitenlängen des Dreiecks und der Formel 12 läßt sich der Winkel α aus der Abbildung 5.6 berechnen. Da die Seiten a und b bekannt sind, wird der Tangens verwendet.

$$\tan\alpha = \frac{a}{b} \qquad (12)$$

Die Abweichungen in Zentimeter und Grad sind im Anhang A1 zu finden.
Ein weiterer wichtiger Punkt bei den Vorüberlegungen ist die Geradlinigkeit. Überlegungen galten der Beeinflussung. Überlegenswert erschien, ob eine Ahängigkeit von der Seite besteht, mit der die Vorwärtsbewegung des Körpers beginnt. Deshalb wurde jede Gangart mit sechs Durchläufen getestet. Das Ergebnis dieser Test erbrachte die Erkenntnis, daß die Geradlinigkeit durch den Beginn (linksseitig oder rechtsseitig) des Schreitvorganges nicht beeinflußt wird.

5.1.4 Ergebniserwartung der Versuchsdurchführung

Vor Versuchsbeginn wurden Überlegungen hinsichtlich des zu erwartenden Ergebnisses angestellt:
Allgemein wird erwartet, daß mit einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V der Roboter sich schneller fortbewegen würde als mit einer Spannung unter 5,9 V.
Beim Tripod Gait wird mit zunehmender Schrittgröße erwartet, daß die benötigten Zeiten abnehmen. Hinsichtlich der Geradlinigkeit sollten keine oder nur sehr geringe Abweichungen vorkommen.
In dem Follow-the-Leader Gait sollte ähnlich wie beim Tripod Gait mit zunehmender Schrittweite die Geschwindigkeit steigen. So schnell wie im Tripod Gait wird sich der Roboter jedoch nicht vorwärts bewegen. Da beim Follow-the-Leader Gait sich alle Beine in der Stützphase befinden, sollten nur geringe Abweichungen in der Geradlinigkeit auftreten.
Vom Equal-Phase Gait wird erwartet, daß diese Gangart die langsamste ist. Mit zunehmender Schrittweite wird auch in dieser Gangart die Geschwindigkeit zunehmen. Es sollten auch nur kleine bis mittlere Abweichungen in der Geradlinigkeit auftreten.
Vom Swing Left und Swing Right kann erwartet werden, daß sie die gleichen Weiten und Zeiten erzielen. Mit ansteigender Schrittweite sollten die zurückzulegenden Strecken und die benötigte Zeit kürzer werden.
Die krummlinige Gangart Turn sollte mit steigender Schrittweite schneller werden. Die Abweichungen sollten gering ausfallen.

5.1.5 Mögliche Fehlerquellen und ihre Vermeidung

Es ist allgemein bekannt, daß eine der am häufigsten auftretenden Fehlerquellen der Ablesefehler ist. Um die Ablesefehler so gering wie möglich zu halten, wurden zum Messen der Akkumulatorspannung und zur Zeitmessung digitale Anzeigegeräte verwendet. Für das Messen der Akkumulatorspannung wurde ein Digital Multimeter des Herstellers Metex mit der Bezeichnung “M-3800“ benutzt. Zur Zeitmessung diente die in einer digitalen Armbanduhr integrierte Stopuhr. Die Uhr wurde manuell bedient, was den Zeitnehmer zur größten Fehlerquelle machte.
Da das Raster im Versuchsfeld manuell mit einem Gliedermaßstab erstellt wurde, waren auch hier Genauigkeitsabweichungen nicht auszuschließen.
Die Eichung des Multimeters und des Gliedermaßstabes wurde jeweils mit einem Zweitgerät überprüft. Die Eichung der Uhr konnte nicht überprüft werden.
Weitere Fehlerquellen ergeben sich aus einer verunreinigten Versuchsstrecke, da die Füße des Schreitroboter auf Sandkörnern leicht ins Rutschen geraten können.
Eine weitere Ursache für Fehler in der Geradlinigkeit ist die nachgemessene Ungleichheit der Beinlängen. Korrekturen der Beinlängen waren nur zum Teil erfolgreich. Bei Abweichungen bis zu einem zehntel Millimeter waren die Korrekturvorgänge nicht mehr erfolgreich.

5.2 Versuchsdurchführung

Da der Versuchsaufbau sich auf die zurückgelegte Strecke von einem Meter begründete, wurde noch eine zusätzliche Markierung in das Rasterfeld eingebracht.
Die Stopuhr wurde gestartet, als der Schreitroboter mit der hinteren Kante des letzten Segmentes die Markierung verlassen hatte. Die Zeitmessung endete, als er die nachträglich eingebrachte Markierung mit der selben hinteren Kante überschritten hatte. In jeder Gangart erfolgte dieser Versuch zehnmal mit der gleichen Schrittweite. In den geradlinigen Gangarten wurde die dafür erforderliche Zeit gemessen. Außerdem wurde die Abweichung in Zentimeter gemessen und anschließend in Grad laut Formel 12 umgerechnet. Die Umrechnungstabelle befindet sich im Anhang A1.
Bei den Bewegungsarten Swing Left und Swing Right sollte er sich solange vorwärtsbewegen, bis der Rumpf sich um neunzig Grad gedreht hat. Zu sehen ist dieses in der Abbildung 5.7 und der Abbildung 5.8.

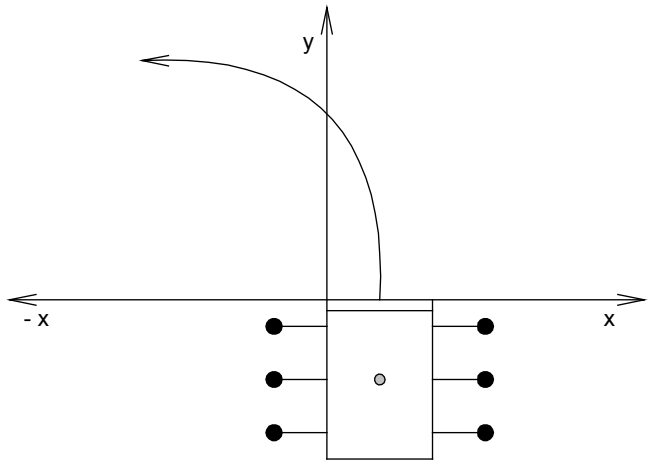


Abbildung 5.7 Swing Left

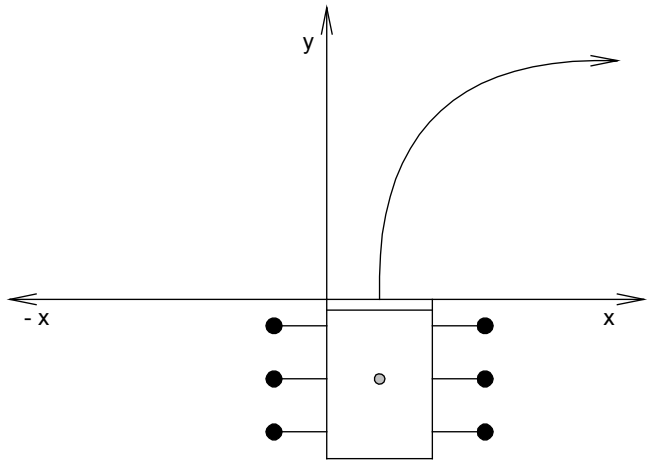


Abbildung 5.8 Swing Right

Die gemessenen Werte geben einen Aufschluß über das Zeitverhalten und die Geradlinigkeit der einzelnen Gangarten. Die durchschnittliche Zeit und Abweichung läßt sich aus den gemessenen Werten errechnen. Anhand des Mittelwertes kann man die Abweichungen zu den Meßwerten vergleichen. Der Mittelwert errechnet sich nach der Formel 13. Da die Meßwerte im positiven wie auch im negativen Bereich liegen können, werden zur Berechnung des Mittelwertes nur die Beträge der Zahlen genommen. Der Mittelwert berechnet sich aus der Summe aller Meßergebnisse durch die Anzahl der Meßwerte.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n} a_i \qquad (13)$$

Da bei den Meßwerten sehr starke Ausreißer vorkommen können, ist der Median eine Alternative zum Mittelwert. Der Median errechnet sich bei diesen Versuchen aus dem Mittelwert der beiden Meßwerte in der Mitte. Als Voraussetzung muß die Meßreihe der Größe nach sortiert sein. Formel 14 zeigt die Berechnung des Median.

$$x_{med} = \frac{1}{2} * \left(x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2+1}} \right) \quad (14)$$

Eine weitere charakteristische Größe neben dem Mittelwert ist das Streumaß (Standardabweichung bzw. die Varianz). Die Varianz ist ein Maß dafür, wie stark die Daten um den Mittelwert streuen.

Für die Varianz gilt: var(x) aus n Daten x_i:

$$\mathrm{var}(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x} \right)^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^{n} x_i{}^2 - n\bar{x}^2 \right] \quad (15)$$

Hierbei wird durch n-1 geteilt, weil der in der Formel eingesetzte Mittelwert aus den Daten berechnet wird. Bei der Berechnung der Varianz wird das Quadrat verwendet, da damit weiter außerhalb liegende Punkte das Ergebnis stärker beeinflussen[8].

Die Standardabweichung wird in der Praxis häufiger als die Varianz verwendet, da sie die gleiche Dimension wie die Meßwerte hat. Die Standardabweichung ist die Wurzel aus der Varianz und wird oft als mittlerer quadratischer Fehler der Einzelwerte bezeichnet.

$$s(x) = \sqrt{\mathrm{var}(x)} \quad (16)$$

Dieser Wert hängt nicht vom Umfang der Stichprobe ab, sondern wird von der Qualität einer Meßmethode beeinflußt. Man sieht aus der Gleichung, daß die wachsende Meßwertanzahl durch die Fehlersummation kompensiert wird[9].

Bei den drei zu errechnenden Werten wird dort, wo negative als auch positive Werte auftreten, nur mit den Beträgen der Werte gerechnet.

5.2.1 Versuchsdurchführung und Auswertung des Tripod Gaits

Diese Gangart wurde in drei verschiedenen Schrittweiten durchgeführt. Um nach der Versuchsdurchführung etwas zu der Geradlinigkeit und dem Zeitverhalten sagen zu können, wurden die Versuche mit einer viertel, einer halben und einer dreiviertel Schrittweite durchgeführt. Die Überlegungen gingen auch dahin, eine ganze Schrittweite zu nehmen. Jedoch Tests haben ergeben, daß die Füße zu oft umknicken.

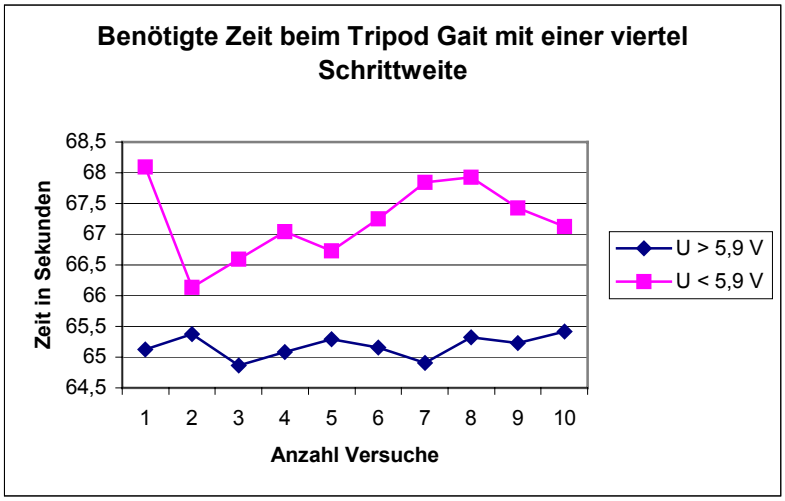


Abbildung 5.9 Benötigte Zeit beim Tripod Gait mit einer viertel Schrittweite

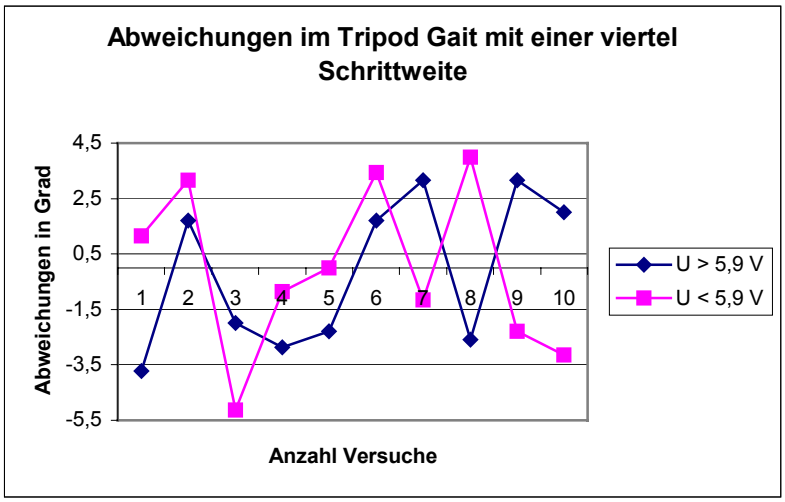


Abbildung 5.10 Abweichungen im Tripod Gait mit einer viertel Schrittweite

Im Diagramm der Abbildung 5.9 ist zu erkennen, daß bei beiden Meßreihen keine Wiederholung der Werte auftreten. Weiterhin ist ersichtlich, daß sich die Kurven nicht überschneiden. Dadurch ist in diesem Versuch gezeigt, daß bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V konstant eine schnellere Streckenbewältigung als mit geringerer Spannung möglich ist.

Der Median für eine Spannung von U > 5,9 V liegt bei 65,20 Sekunden und liegt damit 0,19 Sekunden über der Zeit des Mittelwertes. Bei geringerer Spannung liegt der Median bei einer Zeit von 67,19 Sekunden um 0,027 Sekunden unter dem Mittelwert.

Die Standardabweichung beträgt 0,19 Sekunden bei vollen Akkumulatoren und 0,63 Sekunden bei geringerer Spannung.

Die Abbildung 5.10 zeigt die aufgetretenen Abweichungen. Die Mittelwerte der Abweichungen haben die Werte 2,52 Grad bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V und 2,43 Grad bei geringerer Spannung. Der Median liegt in beiden Fällen über den Mittelwerten. Mit

einer Spannung von U > 5,9 V hat der Median einen Wert von 2,44 Grad, und bei einer Akkumulatorspannung von U < 5,9 V beträgt der Median 2,72 Grad.
Die Standardabweichung beträgt bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V 0,69 Grad und bei einer Spannung unter 5,9 V 1,62 Grad.

Tabelle 5.1 Berechnete Werte des Tripod Gait mit einer dreiviertel Schrittweite

	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
Mittelwert:	65,18 s	2,52 °	67,22 s	2,43 °
Standardabweichung:	0,19 s	0,69 °	0,63 s	1,62 °
Median:	65,20 s	2,44 °	67,19 s	2,72 °

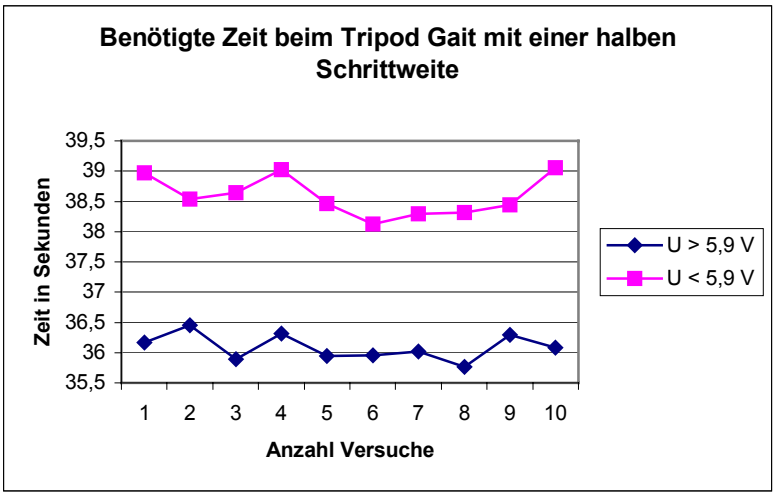


Abbildung 5.11 Benötigte Zeit beim Tripod Gait mit einer halben Schrittweite

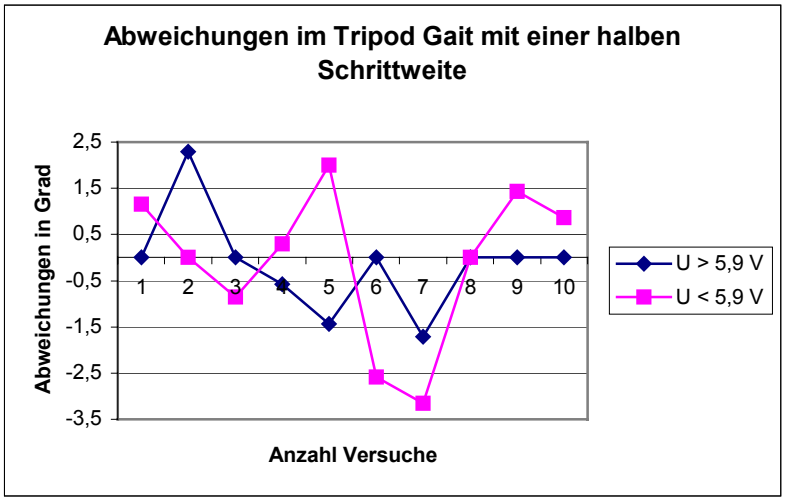


Abbildung 5.12 Abweichungen im Tripod Gait mit einer halben Schrittweite

Die Abbildung 5.11 läßt die Zeitunterschiede bei der Versuchsdurchführung sehr gut erkennen. Weiterhin ist erkennbar, daß die Kurven durch eine Verschiebung fast übereinander

liegen würden. Die benötigten Mittelwerte liegen hier bei 36,09 und 38,59 Sekunden. Das ist eine Differenz von 2,50 Sekunden.
Beim Median ist die Differenz um zwei Sekunden niedriger. Die Werte sind 36,05 Sekunden bei voller Akkumulatorspannung und 38,50 Sekunden bei geringerer Spannung.
Die Standardabweichung bei einer Spannung von U > 5,9 V hat den Wert von 0,22 Sekunden und bei einer Spannung von U < 5,9 V einen Wert von 1,68 Sekunden.

Bei der Geradlinigkeit betragen die Mittelwerte der Abweichungen 0,60 Grad bei höherer Akkumulatorspannung und 1,23 Grad bei geringerer Spannung. Das Diagramm der Abbildung 5.12 läßt erkennen, daß bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V bei sechs Versuchen keine Abweichungen auftreten. Dadurch ist der Median dort Null. Bei geringerer Spannung ist ein Median von 1,00 vorhanden.
Die Standardabweichungen hat bei voller Akkumulatorspannung einen Wert von 0,88 Grad und 1,07 Grad bei einer Spannung U < 5,9 V.

Tabelle 5.2 Berechnete Werte des Tripod Gait mit einer halben Schrittweite

	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
Mittelwert:	36,09 s	0,60 °	38,59 s	1,23 °
Standardabweichung:	0,22 s	0,88 °	1,68 s	1,07 °
Median:	36,05 s	0,00 °	38,50 s	1,01 °

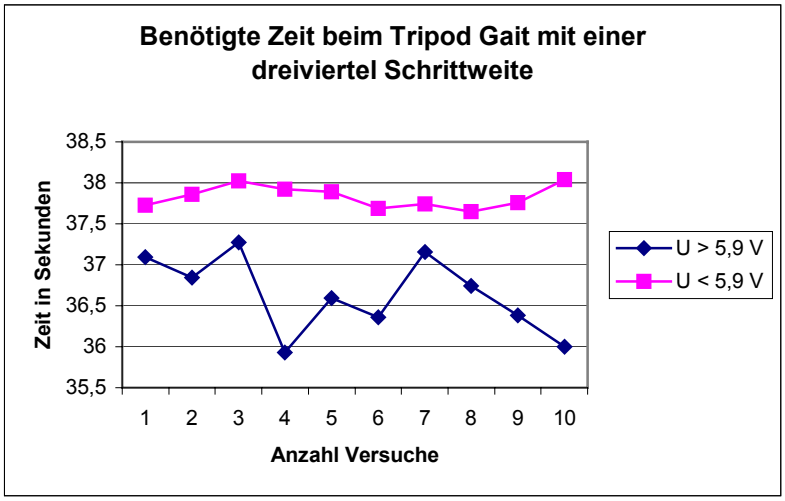


Abbildung 5.13 Benötigte Zeit beim Tripod Gait mit einer dreiviertel Schrittweite

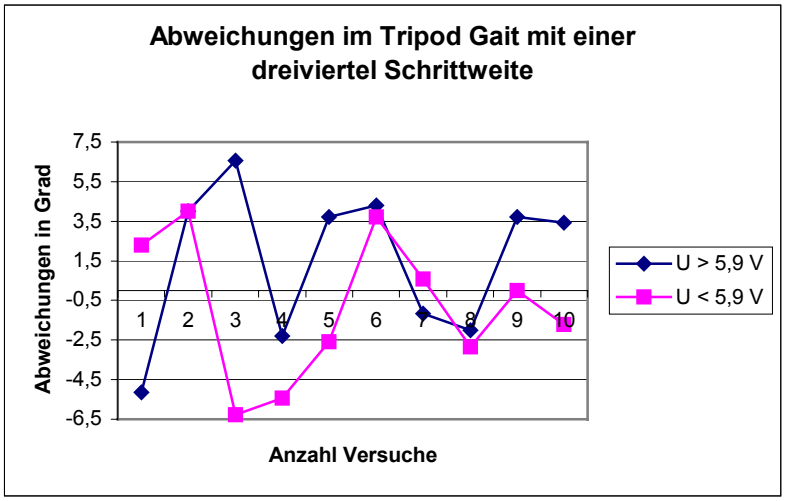


Abbildung 5.14 Abweichungen im Tripod Gait mit einer dreiviertel Schrittweite

Wie die Abbildung 5.13 erkennen läßt, liegen die Geschwindigkeiten der Gangart mit einer dreiviertel Schrittweite wieder näher beieinander. Die Mittelwerte haben eine Differenz von 1,19 Sekunden. Der Mittelwert bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V liegt bei 36,64 Sekunden. Bei einer Spannung von U < 5,9 V liegt dieser bei 37,83 Sekunden. Die Mediane sind bis auf geringe Abweichungen im Zehntelsekundenbereich identisch mit den Durchschnittszeiten. So beträgt der Median bei einer Spannung von U > 5,9 V 36,67 Sekunden und 37,81 Sekunden bei einer Spannung U < 5,9 V.
Die Standardabweichung mit einer Spannung von U > 5,9 V hat einen Wert von 0,47 Sekunden. Bei einer geringeren Spannung beträgt sie 0,14 Sekunden.

Die Mittelwerte der Abweichung sind in dieser Schrittweite größer als bei den beiden vorherigen beiden Versuchspaaren. Der Mittelwert beträgt hier 3,63 Grad bei vollen Akkumulatoren und 2,94 Grad bei geringerer Spannung.
Der Median bei einer Spannung von U > 5,9 V hat einen Wert von 3,72 Grad. Liegt eine Spannung U < 5,9 V, beträgt der Wert des Median 2,72 Grad.
Die Standardabweichungen haben die Werte von 1,57 Grad bei vollen Akkumulatoren und 1,98 Grad bei einer Spannung U < 5,9 V.

Tabelle 5.3 Berechnete Werte des Tripod Gait mit einer dreiviertel Schrittweite

	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
Mittelwert:	36,64 s	3,63 °	37,83 s	2,94 °
Standardabweichung:	0,47 s	1,57 °	0,14 s	1,98 °
Median:	36,67 s	3,72 °	37,81 s	2,72 °

Die Versuchsreihe läßt erkennen, daß eine Akkumulatorspannung von U > 5,9 V bei einer halben Schrittweite die besten Voraussetzungen für eine weitere Arbeit mit dem Schreitroboter hat. Dabei ist die benötigte Zeit am kürzesten, und es liegen die geringsten bzw. keine Abweichungen vor. Allerdings kann diese Spannung nicht sehr lange aufrechterhalten werden. Bei einer Spannung von U < 5,9 V in dieser Schrittweite wurden auch die geringsten Abweichungen erzielt. Die Zeiten bei einer dreiviertel Schrittweite sind zwar etwas niedriger, aber dafür fallen die Abweichungen höher aus.
Kleine Schrittweiten sind am ungeeignetesten, da die benötigten Zeiten fast doppelt so lang und die Abweichungen auch ca. doppelt so hoch sind.
Die Ergebnisse der Versuche stimmen mit den in Kapitel 5.1.4 formulierten Erwartungen in befriedigendem Umfang überein. Etwas überraschend sind die doch teilweise aufgetretenen hohen Abweichungen bei einer dreiviertel Schrittweite.

5.2.2 Versuchsdurchführung und Auswertung des Follow-the-Leader Gaits

Die Tests in dieser Gangart wurden mit den gleichen verschiedenen Schrittweiten wie der Tripod Gait durchgeführt.

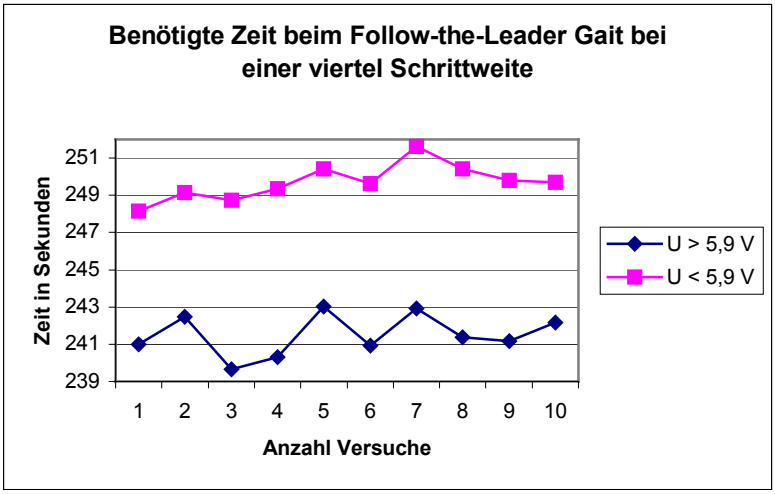


Abbildung 5.15 Benötigte Zeit beim Follow-the-Leader Gait mit einer viertel Schrittweite

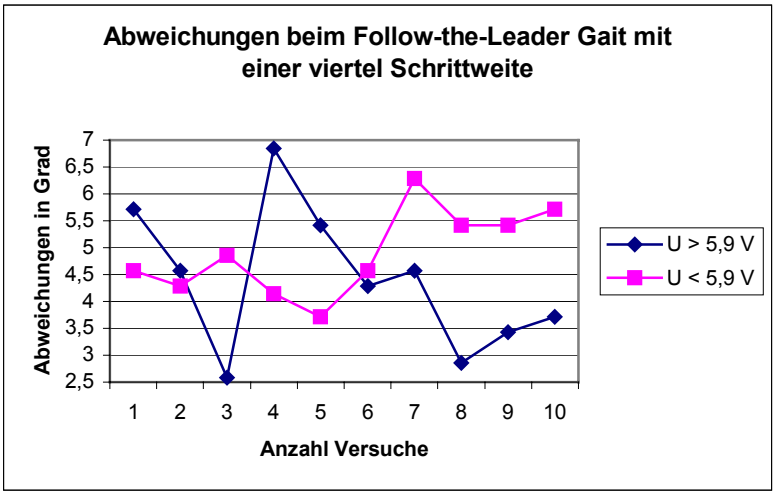


Abbildung 5.16 Abweichungen beim Follow-the-Leader Gait mit einer viertel Schrittweite

Die Abbildung 5.15 läßt eindeutig erkennen, daß die benötigten Zeiten in dieser Gangart etwas weiter auseinanderliegen als beim Tripod Gait. Der Mittelwert hat die Werte 241,50 Sekunden bei einer Spannung von U > 5,9 V und 249,70 Sekunden bei U < 5,9 V.
Die dazugehörigen Mediane sind etwas kleiner als die entsprechenden Mittelwerte. So hat der Median bei einer Spannung von U > 5,9 V einen Wert von 241,27 Sekunden. Bei einer Spannung von U< 5,9 V beträgt der Wert des Median 249,66 Sekunden.
Die Standardabweichung beträgt bei einer Spannung von U > 5,9 V 1,12 Sekunden. Bei geringerer Spannung hat sie einen Wert von 0,97 Sekunden.

Die Abbildung 5.16 zeigt deutlich, daß es keine negativen Abweichungen gibt. Der Mittelwert der Abweichungen bei einer Spannung von U > 5,9 V liegt bei 4,40 Grad. Bei einer Spannung von U < 5,9 V beträgt der Wert 4,90 Grad.
Die Mediane befinden sich auch bei den Abweichungen dicht an den dazugehörigen Mittelwerten. Der Median hat einen Wert von 4,43 Grad bei der Spannung U > 5,9 V und 4,72 Grad bei einer Spannung unter 5,9 V.
Die Standardabweichungen betragen bei einer Spannung von U > 5,9 V 1,33 Grad und bei geringerer Spannung 0,79 Grad.

Tabelle 5.4 Berechnete Werte des Follow-the-Leader Gait mit einer viertel Schrittweite

	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
Mittelwert:	241,50 s	4,40 °	249,70 s	4,90 °
Standardabweichung:	1,12 s	1,33 °	0,97 s	0,79 °
Median:	241,27 s	4,43 °	249,66 s	4,72 °

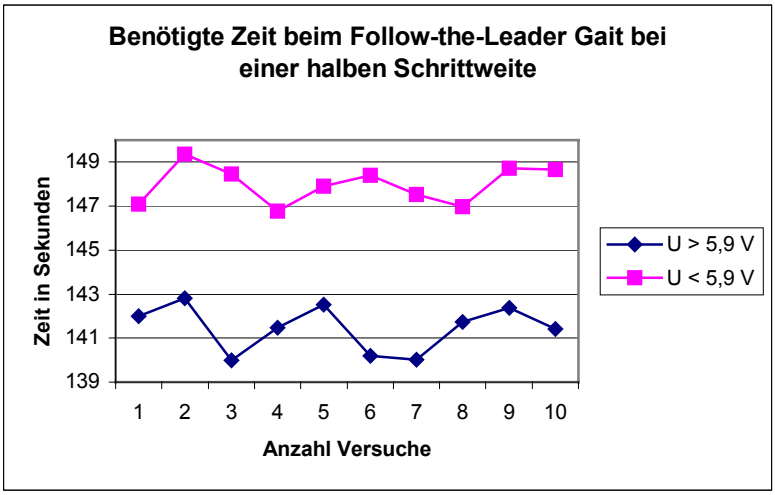


Abbildung 5.17 Benötigte Zeit beim Follow-the-Leader Gait mit einer halben Schrittweite

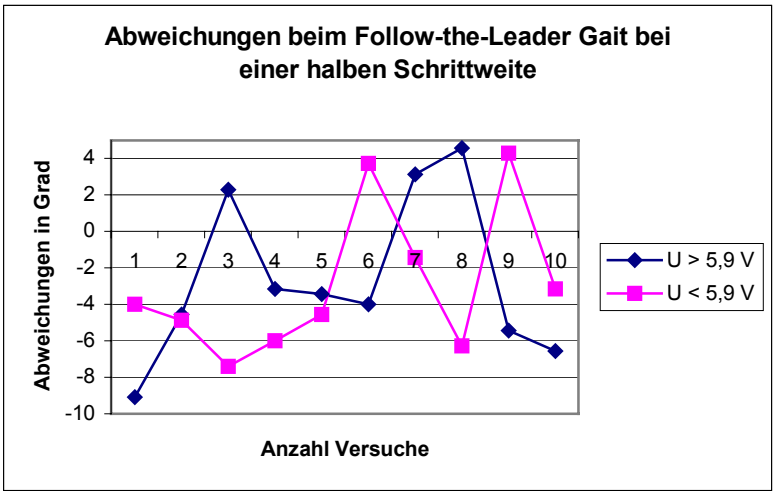


Abbildung 5.18 Abweichungen beim Follow-the-Leader Gait mit einer halben Schrittweite

Bei dem Follow-the-Leader Gait mit einer halben Schrittweite ist im Diagramm der Abbildung 5.17 zu erkennen, daß die Zeitabweichungen in Bezug auf den Ladezustand geringer sind. Die Mittelwerte liegen hier bei 141,45 Sekunden mit vollen Akkumulatoren und 147,99 Sekunden bei einer Akkumulatorspannung U < 5,9 V.

Der Median mit einer Spannung U > 5,9 V hat einen Wert von 141,6 Sekunden und liegt damit 0,15 Sekunden unter dem Mittelwert. Bei einer Spannung von U < 5,9 V hat der Median einen Wert von 148,15 Sekunden und ist damit höher als der Mittelwert.

Die Standardabweichung hat bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V einen Wert von 1,05 Sekunden. Bei geringerer Spannung liegt sie bei 0,87 Sekunden.

Aus dem Diagramm in Abbildung 5.18 geht hervor, daß Abweichungen in der Geradlinigkeit sowohl im positiven als auch im negativen Bereich bestehen. Hier sind je Meßreihe nur noch drei positive Werte, die anderen sind alle negativ. Der Mittelwert der Abweichungen hat bei

einer Spannung U > 5,9 V einen Wert von 4,62 Grad. Liegt eine Spannung von U < 5,9 V an, beträgt der Mittelwert 4,57 Grad.

Der Median liegt bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,0 V bei 4,29 Grad. Befindet sich die Spannung unter 5,9 V, hat der Median einen Wert von 4,43 Grad.

Bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V hat die Standardabweichung einen Wert von 2,0 Grad. Bei geringerer Spannung beträgt diese 1,70 Grad.

Tabelle 5.5 Berechnete Werte des Follow-the-Leader Gait mit einer halben Schrittweite

	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
Mittelwert:	141,45 s	4,62 °	147,99 s	4,57 °
Standardabweichung:	1,05 s	2,00 °	0,87 s	1,70 °
Median:	141,60 s	4,29 °	148,15 s	4,43 °

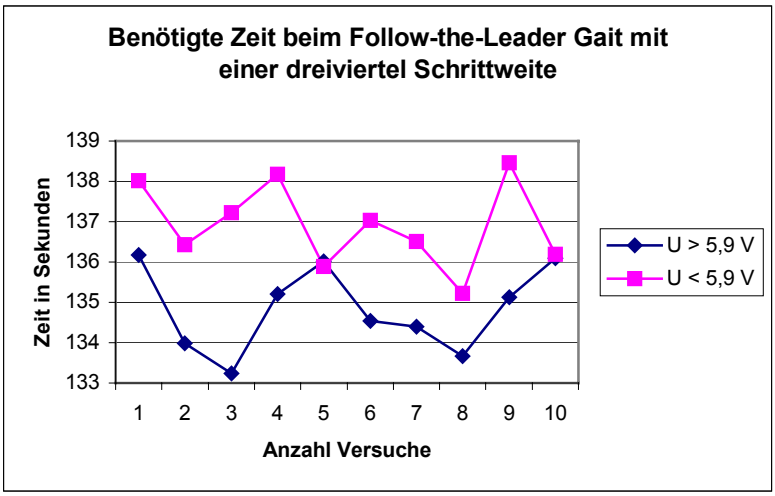


Abbildung 5.19 Benötigte Zeit beim Follow-the-Leader Gait mit einer dreiviertel Schrittweite

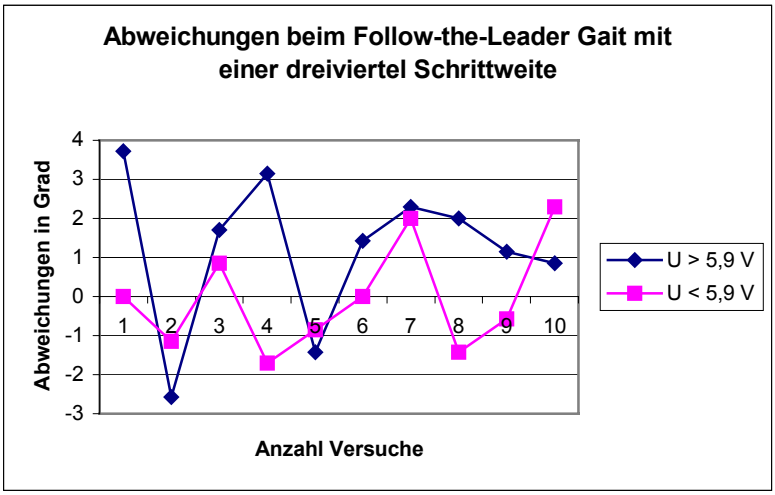


Abbildung 5.20 Abweichungen beim Follow-the-Leader Gait mit einer dreiviertel Schrittweite

Die Abbildung 5.19 zeigt einige Überschneidungen der beiden Meßreihen. In den vorangegangenen Versuchen bestand eine eindeutige Trennung zwischen den Versuchsreihen mit unterschiedlichen Ladezuständen der Akkumulatoren. Der Mittelwert bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V hat einen Wert von 134,84 Sekunden. Bei einer Spannung von U < 5,9 V beträgt der Mittelwert 136,91 Sekunden.
Der Median hat bei vollen Akkumulatoren einen Wert von 134,83 Sekunden. Bei einer Spannung unter 5,9 V beträgt der Median 136,77 Sekunden.
Die Standardabweichung hat bei einer Spannung von U > 5,9 V einen Betrag von 0,91 Grad und bei einer Spannung unter 5,9 V einen Betrag von 0,78 Grad.

Tabelle 5.6 Berechnete Werte des Follow-the-Leader Gait mit einer dreiviertel Schrittweite

	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
Mittelwert:	134,84 s	2,03 °	136,91 s	1,09 °
Standardabweichung:	1,05 s	0,91 °	1,061 s	0,78 °
Median:	134,83 s	1,86 °	136,77 s	1,01 °

In dieser Gangart ist die Spannung von U < 5,9 V bei einer dreiviertel Schrittweite am vorteilhaftesten. Dabei bestehen dort die geringsten Abweichungen und die kürzesten im Gegensatz zu den anderen Schrittweiten. Aus diesen Gründen bietet es sich an, damit zu arbeiten.
Die erwarteten Ergebnisse sind nur teilweise eingetreten. Die zunehmende Geschwindigkeit der Gangart bei zunehmender Schrittweite, hat sich bestätigt.
Allerdings sind die Abweichungen bei einer viertel Schrittweite nur im positiven Bereich. Allgemein wurde nicht mit derart hohen Abweichungen gerechnet.

5.2.3 Versuchsdurchführung und Auswertung des Equal-Phase Gaits

Da laut Definition beim Equal–Phase Gait jedes einzelne Bein in der Horizontalen eine andere Position hat, wurden die einzelnen Positionen für die Beine vorgegeben.
Im nachfolgenden Text wird dann nur noch von einer kleinen, einer mittleren und einer großen Schrittweite gesprochen.

- kleine Schrittweite: 30, 18, 6, -6, -18, -30
- mittlere Schrittweite: 50, 30, 10, -10, -30, -50
- große Schrittweite: 70, 42,14, -14 –42, -70

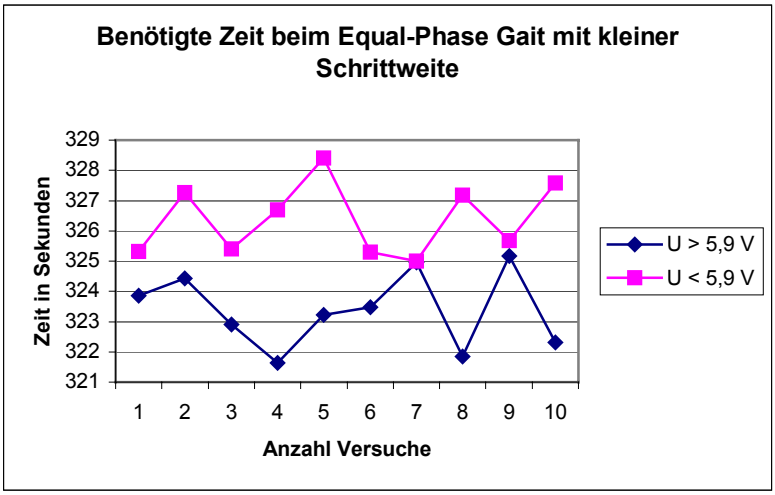


Abbildung 5.21 Benötigte Zeit beim Equal-Phase Gait mit kleiner Schrittweite

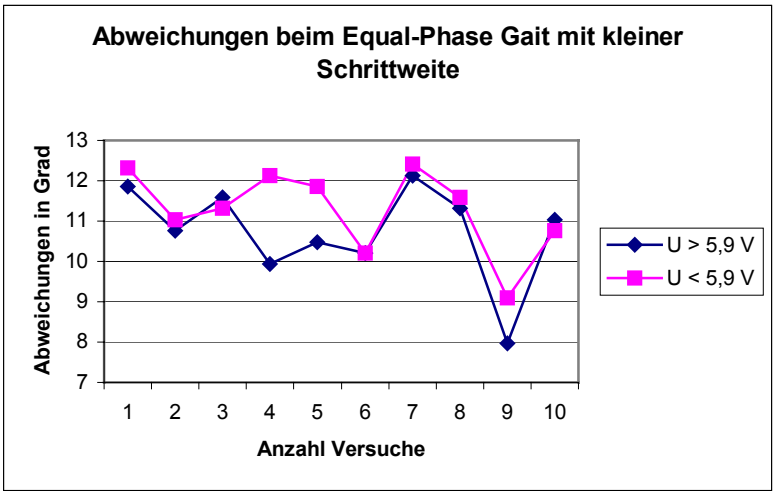


Abbildung 5.22 Abweichungen beim Equal-Phase Gait mit einer kleinen Schrittweite

Die Abbildung 5.21 verdeutlicht, daß die benötigte Zeit, im Vergleich zu den beiden vorher getesteten Gangarten, wesentlich höher ist. Die errechneten Mittelwerte haben die Werte von 323,38 Sekunden bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V und 326,38 Sekunden bei einer Spannung von U < 5,9 V ergeben. Trotz dieser insgesamt benötigten Zeit, liegen die Mittelwerte mit 3 Sekunden Unterschied dicht bei einander.

Bei einer Spannung von U > 5,9 V hat der Median einen Wert von 323,50 Sekunden und bei U < 5,9 V 326,19 Sekunden. Damit liegen beide Mediane dicht an den dazugehörigen Durchschnittswerten.

Eine Standardabweichung von 1,24 Sekunden erhält man bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V. Bei einer Spannung von U < 5,9 V hat die Standardabweichung einen Wert von 1,19 Sekunden.

Bei der Betrachtung der dazugehörigen Abweichungen in der Abbildung 5.22 kann man erkennen, daß nur positive Abweichungen vorgekommen sind. Außerdem fallen diese Abweichungen sehr hoch aus. Daraus folgt, daß in diesen Versuchen ausschließlich Rechtskurven gelaufen wurden. Die Mittelwerte der Abweichungen haben die Werte 10,73 Grad bei einer Spannung von U > 5,9 V und 11,27 Grad bei einer Spannung von U < 5,9 V.
Der Median bei den Abweichungen hat bei einer Spannung von U > 5,9 V einen Wert von 10,9 Grad und 11,45 Grad bei einer Spannung von U < 5,9 V.
Die Standardabweichung beträgt bei einer Spannung von U > 5,9 V 1,20 Grad. Ist die Spannung U < 5,9 V, beträgt die Standardabweichung 1,04 Grad.

Tabelle 5.7 Berechnete Werte des Equal-Phase Gait mit einer kleinen Schrittweite

	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
Mittelwert:	323,38 s	10,73 °	326,38 s	11,27 °
Standardabweichung:	1,24 s	1,20 °	1,19 s	1,04 °
Median:	323,35 s	10,90 °	326,19 s	11,45 °

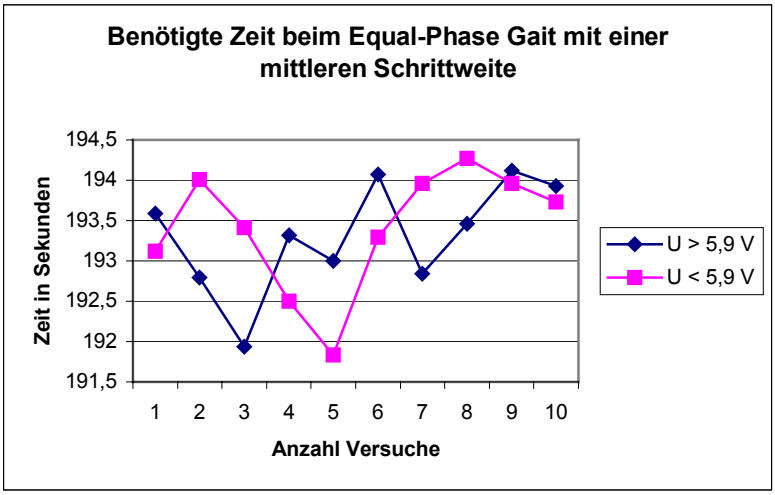


Abbildung 5.23 Benötigte Zeit im Equal-Phase Gait mit einer mittleren Schrittweite

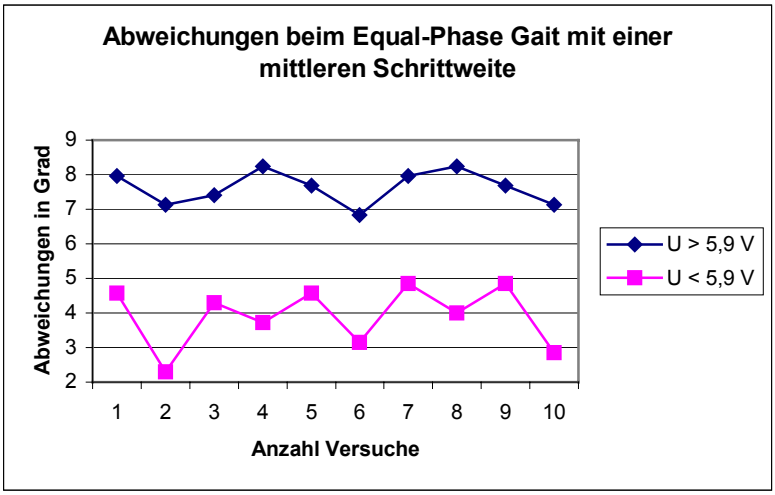


Abbildung 5.24 Abweichungen beim Equal-Phase Gait mit einer mittleren Schrittweite

Bei der Betrachtung des Diagramms der Abbildung 5.23 ohne Beachtung der Legende, kann nicht festgestellt werden, welche Reihe bei welchem Akkumulatorzustand aufgenommen wurde. Erst die Berechnung der Werte der Mediane und der Mittelwerte zeigt auf, daß bei einem vollen Akkumulator die geringfügig schnelleren Zeiten erzielt wurden. Bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V beträgt der Mittelwert 193,31 Sekunden. Der dazugehörige Median hat einen Wert von 193,39 Sekunden. Bei einer Akkumulatorspannung von U < 5,9 V beträgt der Mittelwert 193,41 Sekunden. Der Median hat einen Wert von 193,57 Sekunden.
Die Standardabweichung beträgt bei einer Spannung von U > 5,9 V 0,68 Sekunden. Bei einer Spannung von U < 5,9 V hat sie einen Wert von 0,76 Sekunden.

Die Abbildung 5.24 läßt erkennen, daß sich die Abweichungen nicht wie bisher überschneiden. Die Kurven verlaufen mit einem Mindestabstand von 1,98 Grad.
Dadurch haben auch die Mittelwerte eine Differenz von 3,71 Grad. Der Mittelwert für eine Akkumulatorspannung von U > 5,9 V hat einen Wert von 7,63 Grad. Bei einer Spannung von U < 5,9 V hat er einen Wert von 3,92 Grad.
Bei dem Median verhält es sich ähnlich. Bei einer Spannung von U < 5,9 V hat er einen Wert von 7,69 Grad, und bei geringerer Spannung hat er einen Wert von 4,15 Grad.
Einen Wert von 0,76 Grad hat die Standardabweichung bei einer Akkumulatorenspannung von U > 5,9 V. Bei einer Spannung von U < 5,9 V beträgt sie 0,89 Grad.

Tabelle 5.8 Berechnete Werte des Equal-Phase Gait mit einer mittleren Schrittweite

	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
Mittelwert:	193,31 s	7,63 °	193,41 s	3,92 °
Standardabweichung:	0,68 s	0,49 °	0,76 s	0,89 °
Median:	193,39 s	7,69 °	193,57 s	4,15 °

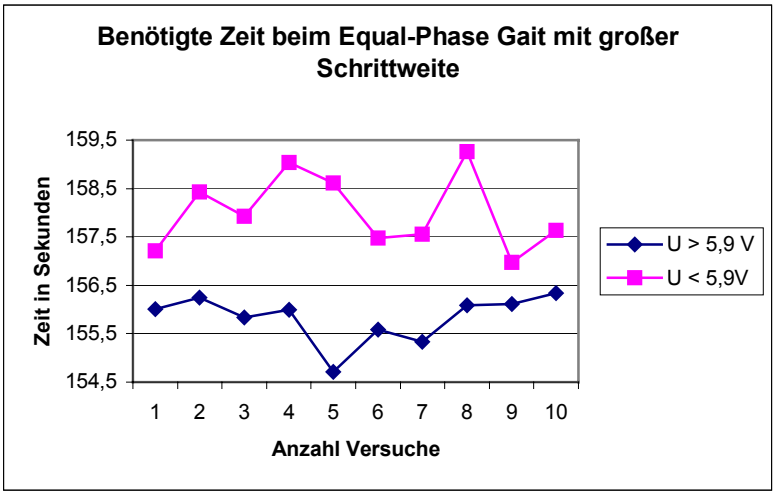


Abbildung 5.25 Benötigte Zeit beim Equal-Phase Gait mit einer großen Schrittweite

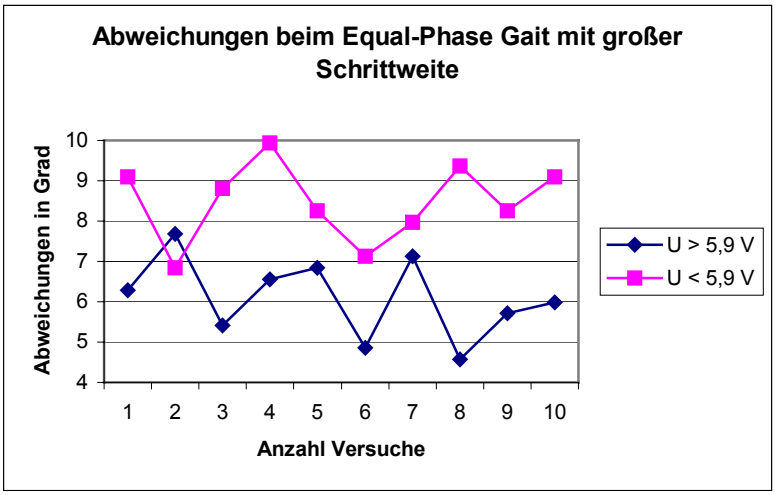


Abbildung 5.26 Abweichungen beim Equal-Phase Gait mit einer großen Schrittweite

Anhand der Meßwerte in Abbildung 5.25 ist wieder ein Unterschied zwischen den zwei Meßreihen zu erkennen. Der Mittelwert bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V beträgt 155,83 Sekunden und 158,01 Sekunden bei einer Spannung von U < 5,9 V.
Der Median hat einen Wert von 156,00 Sekunden bei einer Spannung von U > 5,9 V. Bei einer Spannung von U < 5,9 V hat der Median einen Wert von 157,79 Sekunden.
Die Standardabweichung beträgt bei einer Spannung von U > 5,9 V 0,49 Grad. Fällt die Spannung unter 5,9 V, ist der Wert der Standardabweichung 0,78 Grad.

In der Abbildung 5.26 ist zu erkennen, daß die Abweichungen bei geringerer Spannung höher sind. Der Mittelwert bei einer Spannung über 5,9 V hat einen Wert von 6,11 Grad. Ist die Spannung unter 5,9 V, beträgt sie 8,47 Grad.
Der Median verhält sich in beiden Fällen ähnlich. Bei einer Spannung von U > 5,9 V hat er einen Wert von 6,14 Grad.

Bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V hat die Standardabweichung einen Wert von 0,99 Grad. Einen Wert von 0,98 Grad hat sie bei einer Spannung von U < 5,9 V.

Bei der Versuchsdurchführung hat sich herausgestellt, daß der Equal–Phase Gait mit Abstand die zeitintensivste der untersuchten Gangarten ist.
Weiterhin ist aufgefallen, daß der Schreitroboter in dieser Gangart Schlangenlinien läuft. Dabei kommt es darauf an, auf welcher Seite sich alle drei Beine in der Stützphase befinden. Sind die Beine rechts in der Stützphase, läuft der Schreitroboter eine leichte Linkskurve. Befinden sich dagegen die drei Beine der linken Seite in der Stützphase, geht er eine leichte Rechtskurve.
Hier ist es auch erstmalig, daß die Zeit und die Abweichung in zwei Versuchen identisch sind. In den Abbildung 5.23 und 5.24 bei einer Akkumulatorspannung von U < 5,9 V trat zweimal die Zeit von 193,96 Sekunden und eine Abweichung von 4,86 Grad auf.

Ein Blick in die Tabellen in Anhang A2 läßt sofort erkennen, daß in jeder Schrittweite nur Abweichungen nach rechts in den positiven Bereich aufgetreten sind. Die geringsten Abweichungen treten bei einer mittleren Schrittweite und einer Akkumulatorspannung von U < 5,9 V auf. Daher fällt die Entscheidung auf diese Schrittweite.

Tabelle 5.9 Berechnete Werte des Equal-Phase Gait mit einer großen Schrittweite

	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
Mittelwert:	155,83 s	6,11 °	158,01 s	8,47 °
Sandardabweichung:	0,49 s	0,99 °	0,78 s	0,98 °
Median:	156,01 s	6,135 °	157,79 s	8,53 °

Die erwarteten Ergebnisse haben sich nicht eingestellt. Es sind in allen Schrittweiten nur hohe Abweichungen im positiven Bereich aufgetreten. Kein einziger Versuch hatte negative Abweichungen. Allein die Zeiten sind mit zunehmender Schrittweite kürzer geworden.

5.2.4 Versuchsdurchführung und Auswertung des Swing Left und des Swing Right

Bei dieser Gangart fiel die Entscheidung der Schrittweiten auf die gleichen, wie bei den geradlinigen Bewegungen. Auch in diesen Versuchen wurde die Zeit gestoppt. Im Gegensatz zu den geradlinigen Bewegungen soll hier eine Abweichung erreicht werden. Um diesen Kurvengang zu realisieren, werden für die linken Beine und für die rechten Beine unterschiedliche Schrittweiten genommen. Um die beiden krummlinigen Gangarten besser miteinander vergleichen zu können, erfolgt die Durchführung und Auswertung abwechselnd.

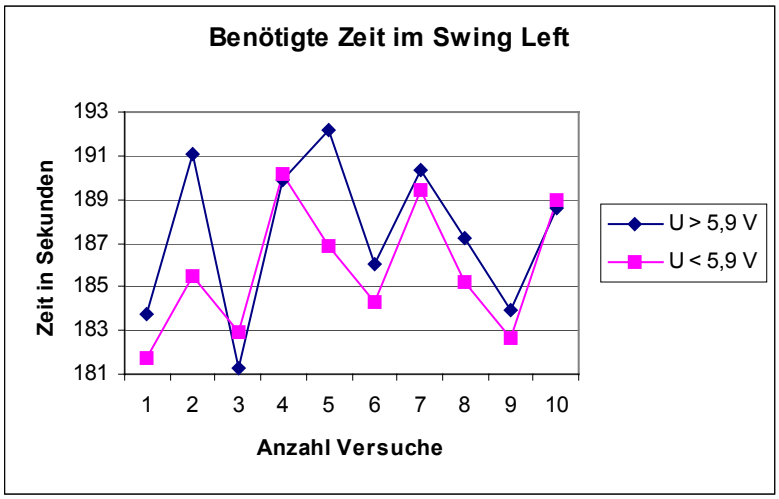


Abbildung 5.27 Benötigte Zeit im Swing Left bei einer mittleren und einer kleinen Schrittweite

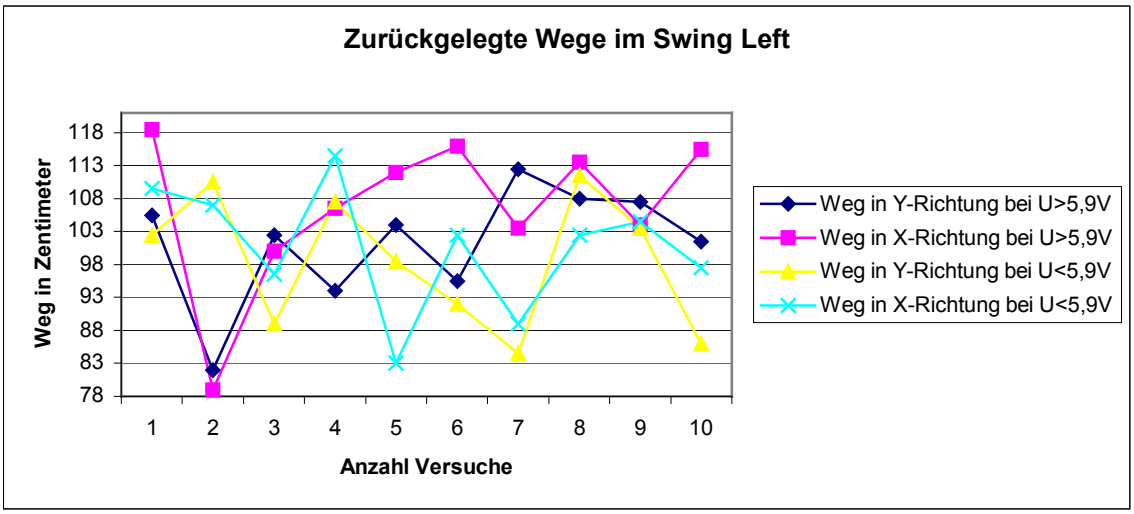


Abbildung 5.28 Benötigte Strecken im Swing Left bei einer mittleren und einer kleinen Schrittweite

In der Abbildung 5.27 ist aus den gemessenen Werten zu erkennen, daß bei vollen Akkumulatoren die Versuchsdurchführung länger gedauert hat, als bei geringerer Spannung. Außerdem sind deutlich größere Zeitunterschiede in den einzelnen Versuchen aufgetreten. Dadurch entstehen die hohen Werte bei der Standardabweichung. Bei einer Spannung von U > 5,9 V beträgt sie 3,61 Sekunden und bei geringerer Spannung 2,99 Sekunden. Der Mittelwert liegt bei einer Spannung von U > 5,9 V bei 187,42 Sekunden. Eine Spannung unter 5,9 V hat einen Mittelwert von 185,77 Sekunden.
Der Median bei vollen Akkumulatoren hat einen Wert von 187,93 Sekunden. Bei einer Spannung unter 5,9 V hat der Median eine Größe von 185,35.

Bei den zurückgelegten Wegen in dieser Gangart ist in Abbildung 5.28 zu sehen, daß die Länge der Strecken sehr stark schwankt. Diese Schwankungen haben zur Folge, daß sich die Standardabweichungen mit 8,79 Zentimeter und 11,58 Zentimeter bei einer Spannung

von U > 5,9 V befinden. Bei einer Spannung unter 5,9 V betragen sie 10,11 Zentimeter und 9,47 Zentimeter.

Die zurückgelegten Strecken in X- und Y-Richtung sind hier bei beiden Spannungszuständen annähernd gleich.

Tabelle 5.10 Berechnete Werte des Swing Left bei einer mittleren und einer kleinen Schrittweite

	U > 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:	U < 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:
Mittelwert:	187,42 s	101,30	106,85	185,77 s	98,55	100,65
Standardabweichung:	3,61 s	8,79	11,58	2,99 s	10,11	9,47
Median:	187,93 s	103,25	109,25	185,35 s	100,50	102,50

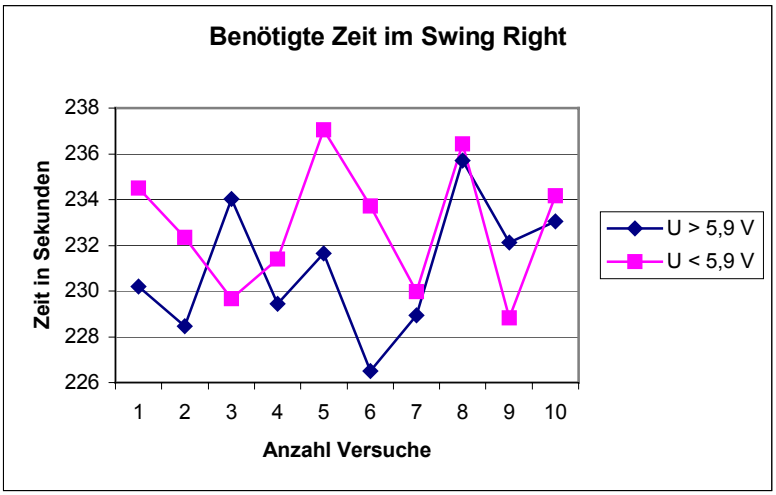


Abbildung 5.29 Benötigte Zeit im Swing Right bei einer mittleren und einer kleinen Schrittweite

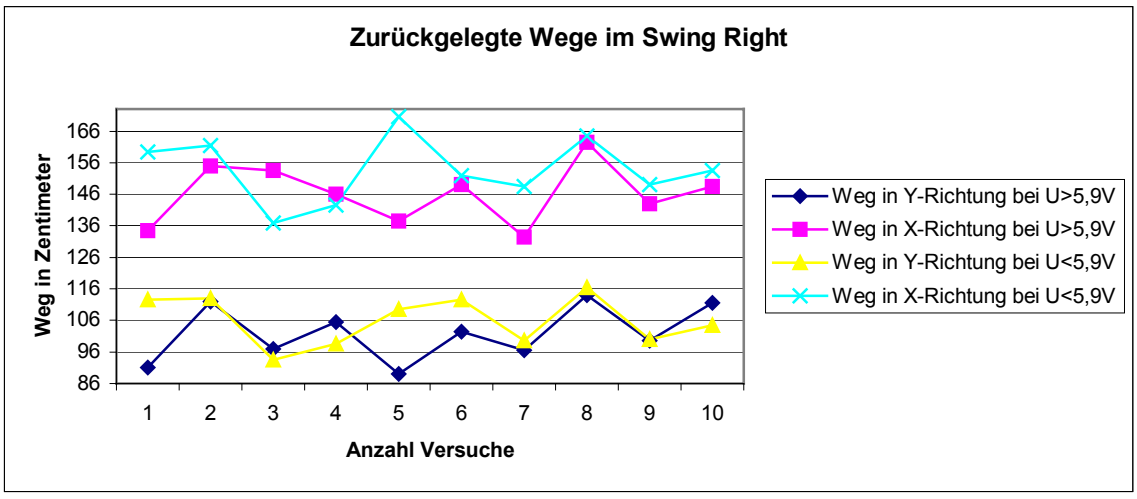


Abbildung 5.30 Benötigte Strecken im Swing Right bei einer mittleren und einer kleinen Schrittweite

Beim Betrachten der Abbildung 5.29 ist zu erkennen, daß bei einer Spannung von U > 5,9 V die benötigten Zeiten wieder niedriger sind als die bei einer Spannung von U < 5,9 V. Der Mittelwert beträgt 231,01 Sekunden bei vollen Akkumulatoren und 232,81 Sekunden bei Ak-

kumulatoren mit einer Spannung unter 5,9 V. Die Standardabweichung hat einen Wert von 2,82 Sekunden bei einer Spannung über 5,9 V und 2,84 Sekunden unter 5,9 V. Ähnliche Werte wie die Durchschnittszeit hat der Median. Liegt die Spannung über 5,9 V, hat er einen Wert von 230,93 Sekunden. Liegt diese jedoch unter 5,9 V beträgt er 233,04 Sekunden.

Deutliche Wegunterschiede in X- und Y-Richtung sind beim Betrachten der Abbildung 5.30 zu erkennen. Bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V sind die Standardabweichungen 8,81 Zentimeter und 9,55 Zentimeter. Die Durchschnittswege betragen 102,85 Zentimeter und 146,20 Zentimeter. Der Median hat die Werte von 101,00 Zentimeter und 147,25 Zentimeter. Bei einer Spannung von U < 5,9 V beträgt die Standardabweichung 7,81 Zentimeter und 10,27 Zentimeter. Die Mittelwerte der Wege haben die Größen 106,00 Zentimeter und 153,85 Zentimeter. Der Median hat die Werte von 107,00 Zentimeter und 152,75 Zentimeter.

Tabelle 5.11 Berechnete Werte des Swing Right bei einer mittleren und einer kleinen Schrittweite

	U > 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:	U < 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:
Mittelwert:	231,01 s	101,85	146,20	232,81 s	106,00	153,85
Standardabweichung:	2,82 s	8,81	9,55	2,84 s	7,81	10,27
Median:	230,93 s	101,00	147,25	233,04 s	107,00	152,75

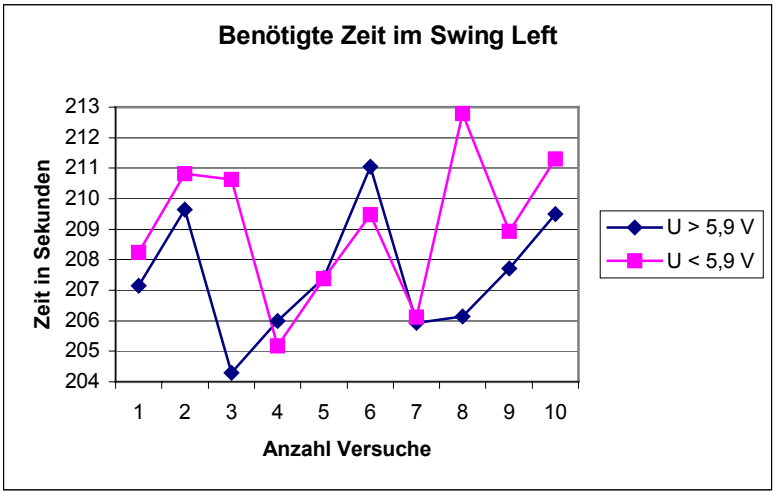


Abbildung 5.31 Benötigte Zeit im Swing Left bei einer dreiviertel und einer viertel Schrittweite

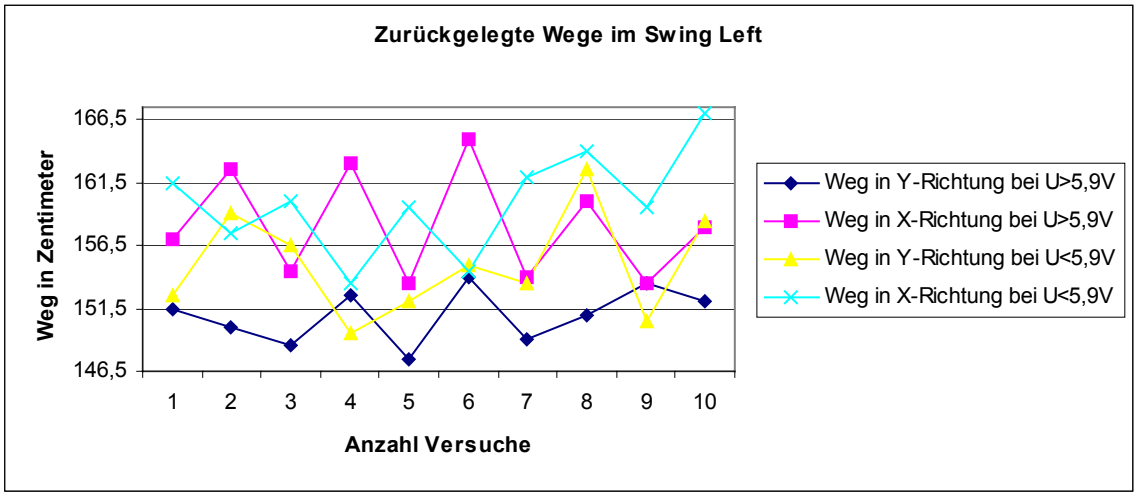


Abbildung 5.32 Benötigte Strecken im Swing Left bei einer dreiviertel und einer viertel Schrittweite

In der Abbildung 5.31 sind die aufgenommenen Zeitmeßwerte zu sehen. Der Mittelwert der Zeit bei einer Spannung von U > 5,9 V beträgt 207,48 Sekunden. Der Median bei dieser Spannung hat einen Wert von 207,7 Sekunden. Die Standardabweichung beträgt 2,06 Sekunden.

Bei einer Spannung von U < 5,9 V beträgt der Mittelwert 209,09 Sekunden. Der dazugehörige Median hat eine Größe von 209,2 Sekunden. Einen Wert von 2,4 Sekunden hat die Standardabweichung bei dieser Akkumulatorenspannung.

Die aufgenommenen Werte zu den zurückgelegten Strecken zeigt die Abbildung 5.32. Man erkennt sofort, daß die Strecken in der X-Richtung länger sind. Bei einer Spannung von U > 5,9 V betragen die Mittelwerte der Strecke 150,95 Zentimeter und 158,1 Zentimeter. Der Median hat die Größen 151,25 Zentimeter und 157,5 Zentimeter. Die errechnete Standardabweichung hat die Werte von 2,17 Zentimeter und 4,32 Zentimeter.

Bei einer Akkumulatorspannung von U < 5,9 V sind die Mittelwerte 154,95 Zentimeter und 159,9 Zentimeter. Die Standardabweichung hat die Größen 4,14 Zentimeter und 4,09 Zentimeter. Beim Median liegen die Werte bei 154,25 Zentimeter und 159,75 Zentimeter.

Tabelle 5.12 Berechnete Werte des Swing Left mit einer großen und kleinen Schrittweite

	U > 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:	U < 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:
Mittelwert:	207,48 s	150,95	158,10	209,09 s	154,95	159,90
Standardabweichung:	2,06 s	2,17	4,32	2,40 s	4,15	4,089
Median:	207,27 s	151,25	157,50	209,20 s	154,25	159,75

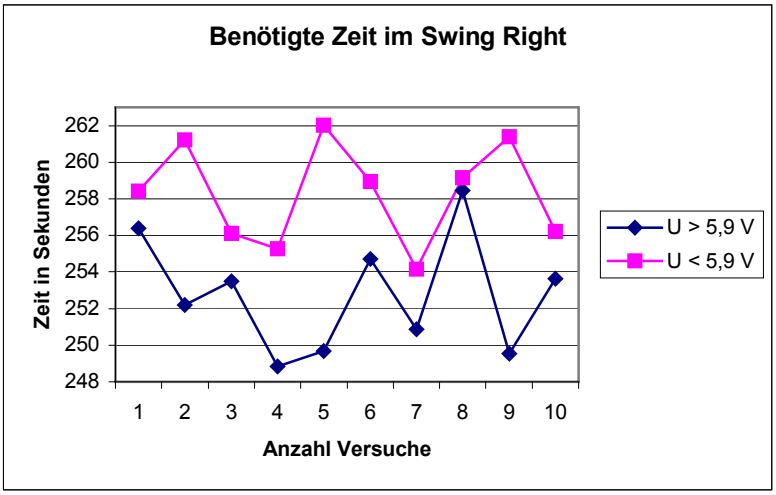


Abbildung 5.33 Benötigte Zeit im Swing Right bei einer großen und einer kleinen Schrittweite

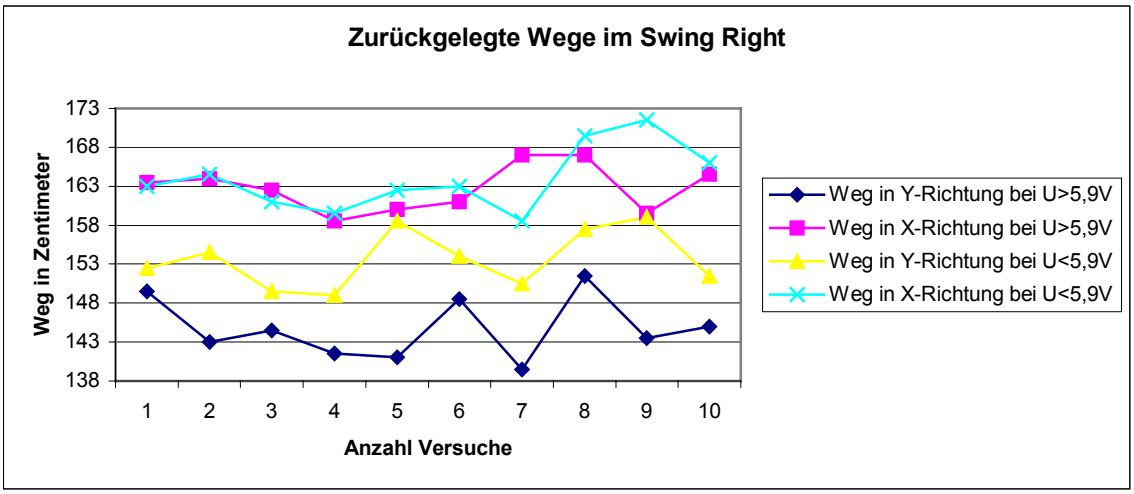


Abbildung 5.34 Benötigte Strecken im Swing Right bei einer großen und einer kleinen Schrittweite

Die Meßwerte, die nachfolgend ausgewertet werden, sind in der Abbildung 5.33 zu sehen. Bei einer Spannung, die höher ist als 5,9 V, liegt der zeitliche Mittelwert bei 252,78 und bei 258,29 Sekunden. Der jeweils dazugehörige Median hat fast die selben Werte. Er beträgt 252,85 Sekunden und 258,68 Sekunden. Die Größen von 3,16 Sekunden und 2,76 Sekunden gehören zur Standardabweichung.

Die Abbildung 5.34 läßt erkennen, daß die Werte bei einer Spannung von U > 5,9 V weiter auseinander liegen als bei einer Spannung von U < 5,9 V. Die Mittelwerte bei einer Spannung von U > 5,9 V sind 144,75 Zentimeter und 162,75 Zentimeter. Die Standardabweichung liegt bei 3,93 Zentimeter und 2,99 Zentimeter. Der Median hat die Werte von 144,00 Zentimeter und 163,00 Zentimeter.
Bei einer Akkumulatorspannung unterhalb von 5,9 V betragen die Mittelwerte 153,65 Zentimeter und 163,90 Zentimeter. Die dazugehörigen Mediane liegen bei 153,25 Zentimeter und

bei 163,00 Zentimeter. Für die Standardabweichung wurden 3,69 Zentimeter und 4,14 Zentimeter berechnet.

Tabelle 5.13 Berechnete Werte des Swing Right mit einer großen und kleinen Schrittweite

	U > 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:	U < 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:
Mittelwert:	252,78 s	144,75	162,75	258,29 s	153,65	163,90
Standardabweichung:	3,16 s	3,936	2,996	2,76 s	3,69	4,14
Median:	252,85 s	144,00	163,00	258,68 s	153,25	163,00

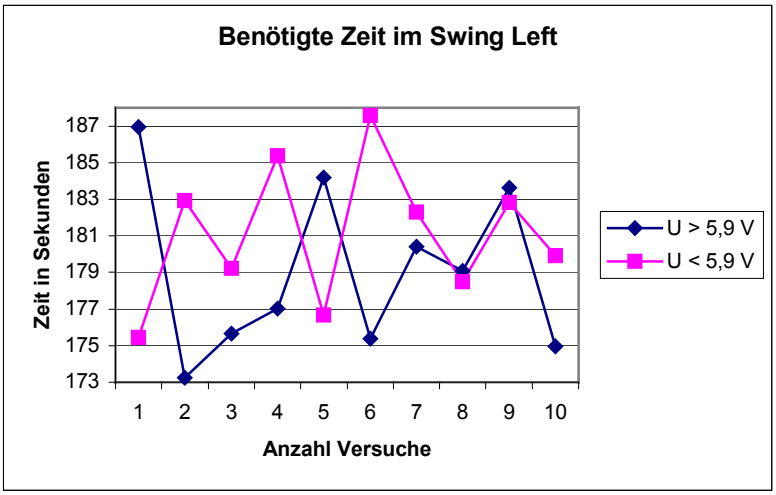


Abbildung 5.35 Benötigte Zeit im Swing Left bei einer großen und einer mittleren Schrittweite

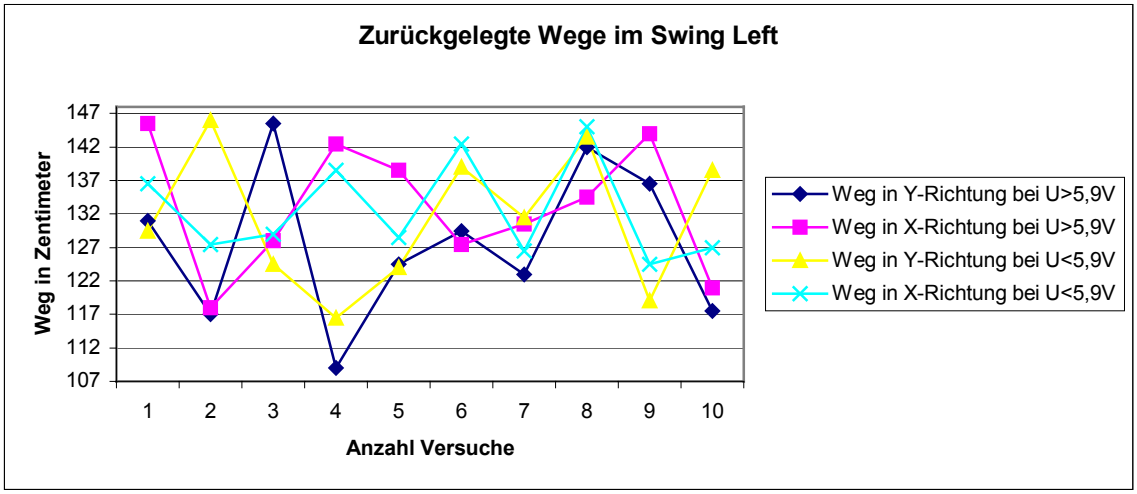


Abbildung 5.36 Benötigte Strecken im Swing Left bei einer großen und einer mittleren Schrittweite

Die Abbildung 5.35 zeigt, daß sich die Werte bezüglich der Dauer überschneiden. Bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V liegt ein berechneter Mittelwert von 179,06 Sekunden vor mit dem dazugehörigen Median von 178,06 Sekunden. Die Standardabweichung hat eine Größe von 4,61 Sekunden. Bei einer Akkumulatorspannung von U < 5,9 V liegt der Mit-

telwert bei 181,08 Sekunden, der Median 181,12 Sekunden und die Standardabweichung bei 3,82 Sekunden.

Die Abbildung 5.36 gibt Aufschluß über die gemessenen Strecken in dieser Gangart mit den entsprechenden Schrittweiten. Der Mittelwert liegt mit einer Spannung von U > 5,9 V bei 127,55 Zentimetern und bei 133,00 Zentimetern, die Standardabweichung bei 11,61 Zentimeter und 9,61 Zentimeter und der Median bei 127,00 Zentimeter und 132,5 Zentimeter.
Ist die Spannung unterhalb von 5,9 V, beträgt der Mittelwert 131,20 Zentimeter und 132,55 Zentimeter. Der dazugehörige Median hat 130,50 Zentimeter und 128,75 Zentimeter. Die berechneten Standardabweichungen sind 10,27 Zentimeter und 7,39 Zentimeter.

Tabelle 5.14 Berechnete Werte des Swing Left mit einer großen und mittleren Schrittweite

	U > 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:	U < 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:
Mittelwert:	179,06 s	127,55	133,00	181,08 s	131,20	132,55
Standardabweichung:	4,61 s	11,61	9,61	3,82 s	10,27	7,39
Median:	178,06 s	127,00	132,50	181,12 s	130,50	128,75

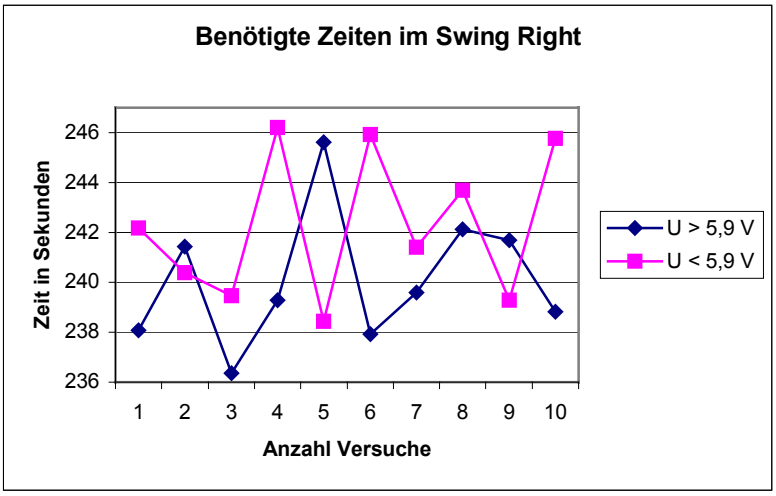


Abbildung 5.37 Benötigte Zeit im Swing Right bei einer großen und einer mittleren Schrittweite

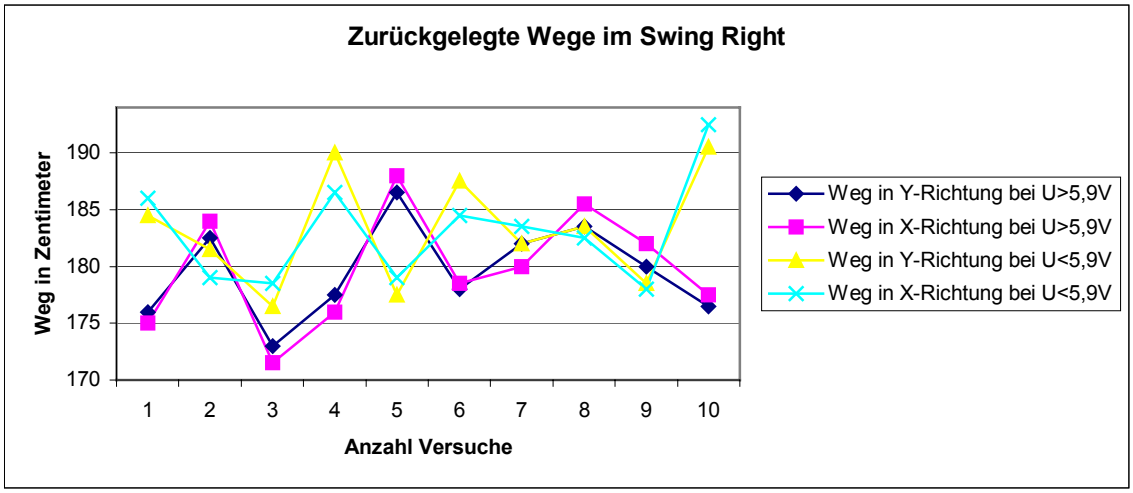


Abbildung 5.38 Benötigte Strecken im Swing Right bei einer großen und einer mittleren Schrittweite

Die nachfolgenden Daten errechnen sich aus den Werten, die in Abbildung 5.37 dargestellt sind. Bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V ist der Mittelwert 240,09 Sekunden mit dem dazugehörigen Median von 239,43 Sekunden. Die errechnete Standardabweichung liegt bei 2,67 Sekunden. Bei einer Spannung von U < 5,9 V beträgt der Mittelwert 242,27 Sekunden, der Median 241,80 Sekunden und die Standardabweichung 2,96 Sekunden.

Im Diagramm der Abbildung 5.38 sind die gemessenen Strecken dargestellt. Der Mittelwert hat bei einer Spannung von U > 5,9 V die Werte von 179,55 Zentimeter und 179,80 Zentimeter. Der Median liegt bei 179,00 Zentimeter und bei 179,25 Zentimeter. Die errechnete Standardabweichung beträgt 4,09 Zentimeter und 5,12 Zentimeter.
Bei einer Spannung von U < 5,9 V liegt der Mittelwert bei 183,20 Zentimeter und bei 183,00 Zentimeter. Der Median hat die Größen 182,75 Zentimeter und 183,00 Zentimeter und die Standardabweichung 4,98 Zentimeter und 4,61 Zentimeter.

Tabelle 5.15 Berechnete Werte des Swing Right mit einer großen und mittleren Schrittweite

	U > 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:	U < 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:
Mittelwert:	240,09 s	179,55	179,80	242,27 s	183,20	183,00
Standardabweichung:	2,67 s	4,09	5,12	2,96 s	4,98	4,61
Median:	239,43 s	179,00	179,25	241,80 s	182,75	183,00

Beim Swing Right ist der zurückgelegte Weg nach rechts erheblich länger ist als der nach links, außer bei der großen und mittleren Schrittweite. Dieses fällt beim Betrachten der Diagramme und der dazugehörigen Auswertung auf.
Die erwarteten Ergebnisse haben sich nicht bestätigt. Da nur die Schrittweiten ausgetauscht wurden zwischen dem Swing Left und dem Swing Right, wäre mit gleichen Weiten und Zeiten zu rechnen gewesen.

Kurvendiagramme sind im Anhang 3 zu sehen. Da aber keine Zwischenwerte aufgenommen wurden, sind die Kurven nur Näherungswerte.

5.2.5 Versuchsdurchführung und Auswertung des Turn

Bei der Versuchsdurchführung vom Turn ist aufgefallen, daß hier ein Rutschen der Füße nicht vermeidbar war. Bei dieser krummlinigen Gangart wurde nach einer Umdrehung von dreihundertsechzig Grad der Abstand des Mittelpunktes zum Ausgangsmittelpunkt gemessen.

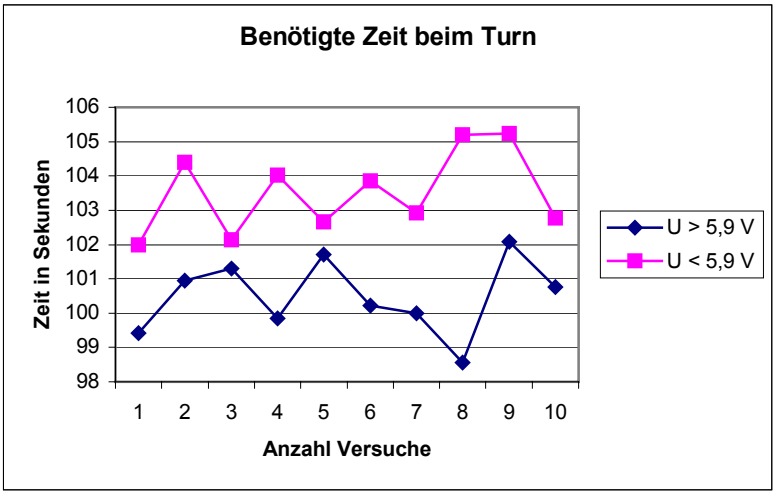


Abbildung 5.39 Benötigte Zeit beim Turn mit einer viertel Schrittweite

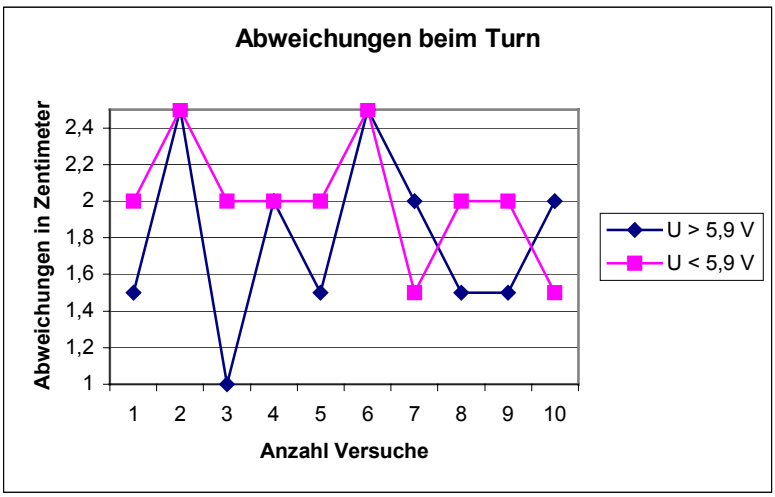


Abbildung 5.40 Abweichungen beim Turn mit einer viertel Schrittweite

Aus den Werten in der Abbildung 5.39 ergeben sich für die Mittelwerte die Werte 100,49 Sekunden bei einer Spannung von U > 5,9 V und 103,52 Sekunden für eine Spannung von U < 5,9 V.

Der Median bei vollen Akkumulatoren entspricht dem Mittelwert. Bei geringerer Spannung weicht er etwas ab und hat einen Wert von 103,39 Sekunden.
Die Standardabweichung bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V hat einen Wert von 1,09 Sekunden. Bei einer Spannung unter 5,9 V beträgt der Wert der Standardabweichung 1,19 Sekunden.

Bei den Abweichungen liegen die Mittelwerte der Abweichungen bei 1,80 Zentimeter mit einer Spannung von U > 5,9 V. Zwei Zentimeter beträgt die Abweichung bei einer Spannung von U < 5,9 V.
Weiterhin ergibt sich aus den Werten des Diagramms, das in Abbildung 5.40 dargestellt ist, ein Median mit einem Wert von 1,75 Zentimeter bei einer Spannung über 5,9 V. Bei einer Spannung von U < 5,9 V hat er einen Wert von zwei Zentimeter und ist damit identisch mit dem dazugehörigen Mittelwert.
Bei einer Spannung von U > 5,9 V ist die Standardabweichung 0,48 Zentimeter. Bei einer Spannung unterhalb der Grenze von 5,9 V beträgt sie 0,33 Zentimeter.

Tabelle 5.16 Berechnete Werte des Turn mit einer viertel Schrittweite

	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
Mittelwert:	100,49 s	1,80 cm	103,52 s	2,00 cm
Standardabweichung:	1,09 s	0,48 cm	1,19 s	0,33 cm
Median:	100,49 s	1,75 cm	103,39 s	2,00 cm

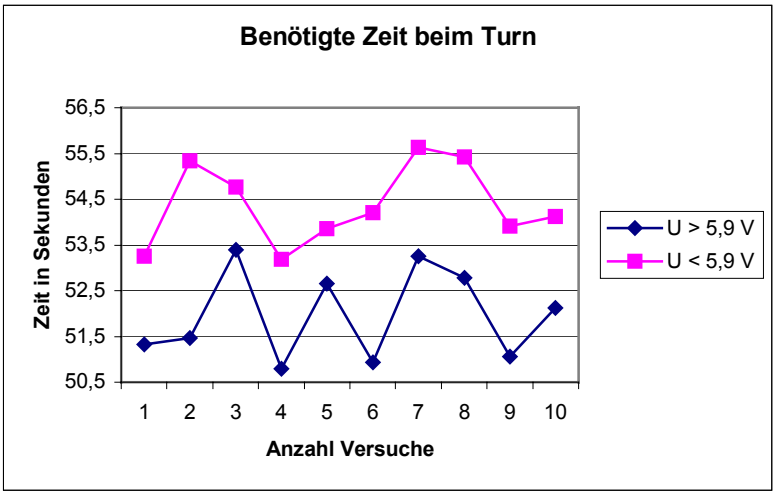


Abbildung 5.41 Benötigte Zeit beim Turn mit einer halben Schrittweite

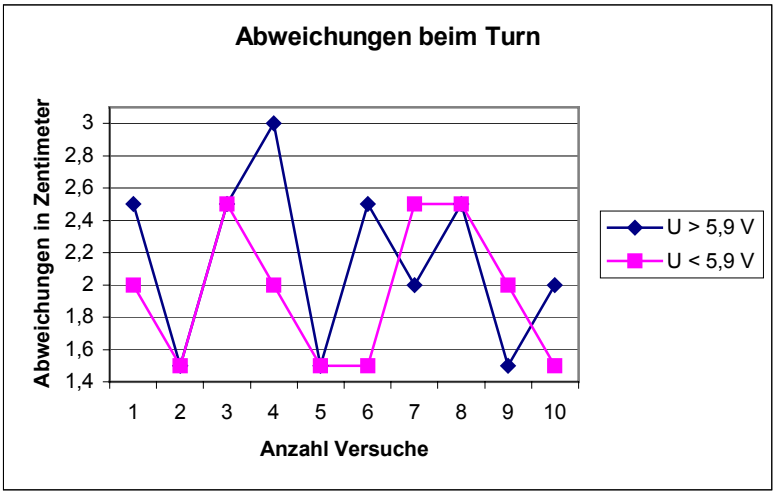


Abbildung 5.42 Abweichungen beim Turn mit einer halben Schrittweite

Die Abbildung 5.41 zeigt die Größen für die Mittelwerte bei einer Spannung über 5,9 V von 51,98 Sekunden und unter 5,9 V bei 54,37 Sekunden.
Der Median beträgt bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V 51,79 Sekunden. Bei einer Spannung unter 5,9 V hat er einen Wert von 54,17 Sekunden.
Einen Wert von 0,99 Sekunden hat die Standardabweichung bei einer Akkumulatorspannung von U > 5,9 V. Liegt die Spannung unter 5,9 V, beträgt sie 0,88 Sekunden

Das Diagramm der Abbildung 5.42 stellt folgende Größen bei einer Spannung von U > 5,9 V dar. Der Mittelwert hat einen Wert von 2,15 Zentimeter und liegt damit 0,10 Zentimeter unter dem Median von 2,25 Zentimeter. Die Standardabweichung hat eine Größe von 0,53 Zentimetern.

Tabelle 5.17 Berechnete Werte des Turn bei einer halben Schrittweite

	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
Mittelwert:	51,98 s	2,15 cm	54,37 s	1,95 cm
Streuung:	0,99 s	0,53 cm	0,88 s	0,44 cm
Median:	51,79 s	2,25 cm	54,17 s	2,00 cm

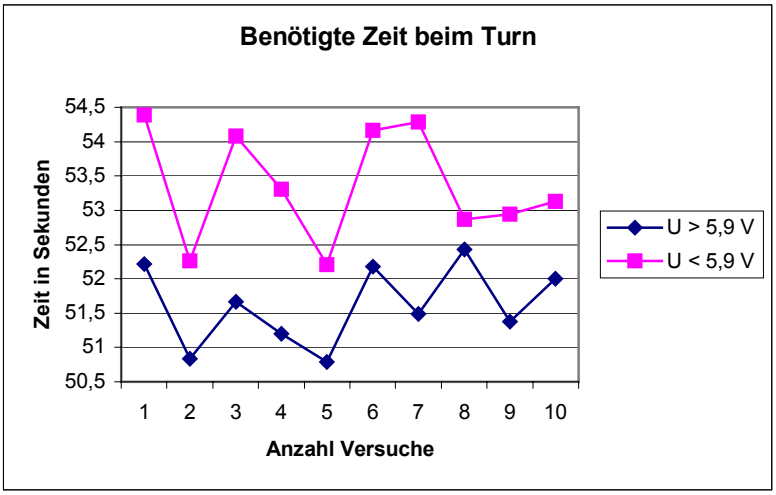


Abbildung 5.43 Benötigte Zeit beim Turn mit einer dreiviertel Schrittweite

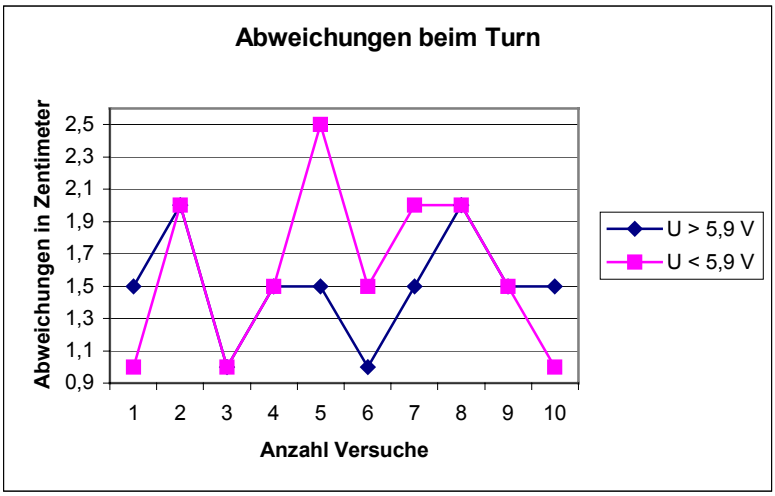


Abbildung 5.44 Abweichungen beim Turn mit einer dreiviertel Schrittweite

Im Gegensatz zum Turn mit einer halben Schrittweite, ist der Turn mit einer dreiviertel Schrittweite nur geringfügig schneller. Aus den Meßwerten des Diagramms in der Abbildung 5.43 ergeben sich 51,62 Sekunden als Mittelwert bei einer Spannung von U > 5,9 V und 53,36 Sekunden bei einer Spannung von U < 5,9 V.

Die Mediane liegen nur dicht unter den dazugehörigen Mittelwerten. Bei einer Spannung von U > 5,9 V beträgt er 51,58 Sekunden. Ein Wert von 53,22 Sekunden errechnet sich bei einer Spannung unter 5,9 V.

Die Standardabweichung bei einer Spannung von U > 5,9 V ist 0,58 Sekunden und unter 5,9 V 0,82 Sekunden.

Tabelle 5.18 Berechnete Werte des Turn bei einer dreiviertel Schrittweite

	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
Mittelwert:	51,62 s	1,50 cm	53,36 s	1,60 cm
Streuung:	0,56 s	0,33 cm	0,82 s	0,52 cm
Median:	51,58 s	1,50 cm	53,22 s	1,50 cm

Beim Betrachten des Diagramms in der Abbildung 5.44 sieht man, daß bei einer Spannung von U > 5,9 V siebenmal die gleiche Abweichung von 1,5 Zentimeter aufgetreten ist. Der Mittelwert und der Median haben den selben Wert von 1,5 Zentimeter. Durch diese gleichmäßigen Abweichungen hat die Standardabweichung nur einen Wert von 0,33 Zentimeter.
Bei einer Spannung von U < 5,9 V beträgt die Standardabweichung 0,52 Zentimeter. Der Mittelwert liegt mit 1,6 Zentimeter 0,1 Zentimeter über dem Median.

Bei der Gangart Turn ist während der Versuchsdurchführung festgestellt worden, daß niemals die Abweichung Null war.
Für den Umgang mit “SimengDolores“ in der Gangart Turn, bietet es sich an, eine dreiviertel Schrittweite zu verwenden, da hier die geringsten Abweichungen erzielt wurden.
Nachteilig wirkt sich jedoch aus, daß in dieser Schrittweite regelmäßig ein Bein umknickt. Bei der mittleren Schrittweite trat ein Umknicken der Füße genauso häufig auf. Nur bei einer viertel Schrittweite hat sich das Umknicken der Füße auf dreißig Prozent reduziert.
Die erwarteten Ergebnisse in Bezug auf die Abweichungen sind eingetroffen. Die Abweichungen sind gering. Allerdings blieb die erwartete deutliche Geschwindigkeitssteigerung zwischen der halben und der dreiviertel Schrittweite aus.

5.2.6 Allgemeines zur Versuchsauswertung

Die Versuchsdurchführung war sehr zeitaufwendig, da die Versuche mit einer Akkumulatorspannung U > 5,9 V auf eine sehr geringe Zahl beschränkt war. Im Equal–Phase Gait dauerte ein einzelner Versuch schon über fünf Minuten. Nach dem Versuch konnte der Akkumulator nicht mehr die benötigte Spannung bereitstellen und mußte neu geladen werden.
Das Umknicken der Füße konnte bei einer dreiviertel Schrittweite in jedem Versuch beobachtet werden. Auf etwa dreißig Prozent der Versuche senkte sich das Umknicken bei einer kleinen Schrittweite. Durch das Umknicken der Füße treten Abweichungen bei den Meßwerten auf, welche die Geradlinigkeit erheblich beeinflussen. Ist ein Fuß erst einmal umgeknickt, fängt er beim Hochheben an zu schwingen. Dieses hat zur Folge, daß der Fuß beim nächsten Aufsetzen auf den Boden nicht mehr mit der vollen Trittfläche aufsetzt, sondern in den meisten Fällen mit einer Kante. Dadurch knickt der Fuß unweigerlich bei der nächsten Bewegung des Roboters wieder um.

Es kam genau einmal vor, daß es zwei gleiche Zeiten mit den gleichen Abweichungen in einer Versuchsdurchführung gab.
Weiterhin hat die Versuchsdurchführung ergeben, daß der Tripod Gait die schnellste Gangart, der Follow-the-Leader Gait die zweitschnellste und der Equal-Phase Gait die langsamste Gangart ist.
In der Tabelle 5.19 sind die am geeignetesten Gangarten mit den Mittelwerten bei einer Akkumulatorspannung von U < 5,9 V aufgeführt.
Beim Tripod Gait mit einer halben Schrittweite ist die Zeit nur geringfügig höher als mit einer dreiviertel Schrittweite. Da aber die Abweichungen über 1,5 Grad niedriger sind, wurde diese Schrittweite gewählt.
Bei dem Follow-the-Leader Gait sind die Zeiten und Abweichungen in dieser Schrittweite am geringsten.
Der Equal-Phase Gait ist mit einer mittleren Schrittweite über dreißig Sekunden langsamer als mit einer großen, aber dafür liegt die Abweichung mit vier Grad unter der Abweichung mit einer großen Schrittweite.
Die Wahl beim Turn fiel auf eine halbe Schrittweite trotz größerer Zeiten und Abweichungen, weil hier nur noch maximal ein Fuß umknickt.
Beim Swing Left und Swing Right fiel die Wahl auf die Kombination der Schrittweiten dreiviertel und halb, weil die zurückgelegten Wege in beide Richtungen (X und Y) fast identisch sind.

Tabelle 5.19 Übersicht der geeignetesten Schrittweiten mit den dazugehörigen Mittelwerten

Gangart	Zeit in s	Abweichung in Grad	Y-Richtung Weg in cm	X-Richtung Weg in cm	Schrittweite
Tripod Gait	38,59	1,23			halbe
Follow-the-Leader Gait	136,91	1,09			dreiviertel
Equal-Phase Gait	193,41	3,92			halbe
Swing Left	181,08		131,20	132,55	große und halbe
Swing Right	242,27		183,20	183,00	große und halbe
Turn	54,37	1,95			halbe

Weiterhin ist bei der Versuchsdurchführung aufgefallen, daß der Schreitroboter immer wieder mechanische Probleme hatte. So wurden während der Versuchsdurchführung sechs Zahn-

räder gewechselt, die für die vertikale Beinbewegung zuständig sind. Die Zahnräder waren dort abgenutzt, wo die Antriebswelle vom Motor befestigt ist. Dieses hatte zur Folge, daß die Zahnräder auf den Wellen rutschten. So einen technischer Defekt wurde meistens nicht sofort festgestellt, sondern erst, wenn dieser sich stärker bemerkbar macht. Durch dieses Problem kann sich die Nullstellung der Beine ändern und ist damit ein weiterer Grund für eventuelle Abweichungen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Aufgabe dieser Diplomarbeit war die Programmierung und experimentelle Untersuchung von geradlinigen und krummlinigen Gangarten des Schreitroboters SimengDolores.

Nach der Einführung in die verschiedenen Geländearten, erfolgte eine Beschreibung des Schreitroboters „SimengDolores“ im Detail. Im Anschluß daran wurden, mit Blick auf die folgende Programmierung, die in den Versuchen zu testenden Gangarten vorgestellt.
Nachdem der Schreitroboter programmiert wurde, folgten die Vorüberlegungen und Vorbereitungen zur Versuchsdurchführung. Nach der Durchführung der Versuche wurden diese ausgewertet.

6.2 Ergebnisse

Die Arbeit mit dem Schreitroboter “SimengDolores“ war eine große Herausforderung. Durch die Überlegungen zu der Herangehensweise und den Berechnungen sowie der anschließenden Ausführung ist das allgemeine Wissen über Roboter um ein vielfaches gestiegen.
Beim täglichen Arbeiten mit dem Schreitroboter waren die kleinen und größeren Probleme eine Herausforderung, das theoretische und praktische Wissen zu erhöhen, um diese zu lösen.
Es wurden 360 Versuche durchgeführt und statistisch ausgewertet, davon 60 Versuche in jeder Gangart, aber mit einer unterschiedlichen Schrittweite.
Einige Ergebnisse stimmten mit den Vorüberlegungen überein. Die Laufzeiten sind zu einem großen Teil vom Ladezustand der Akkumulatoren abhängig. Andere Ergebnisse, wie zum Beispiel die Geradlinigkeit der einzelnen Gangarten, waren doch überraschend, da mit so hohen Abweichungen im Vorfeld nicht gerechnet wurde.

Die Schrittweiten waren nicht optimal gewählt. Drei verschiedene Schrittweiten zu testen, deckt nicht alle Möglichkeiten und Konstellationen ab. Da die Durchführung besonders bei kleinen und sehr kleinen Schrittweiten sehr zeitintensiv ist, würde eine Automatisierung der Auswertung dem Anwender zugute kommen.

6.3 Ausblick

Die erzielten Ergebnisse können beim weiteren Umgang mit dem Schreitroboter verwendet werden. Da die Auswertung der Versuche darüber Auskunft gibt, in welcher Schrittweite die

geringsten Abweichungen auftreten, besteht die Möglichkeit diese optimal auszuwählen. Es gibt auch die Möglichkeit, Gangarten mittels Programmierung zu mehr Geradlinigkeit zu verhelfen.

Da der Roboter in der Zukunft noch mit einer Kamera ausgerüstet werden soll, kann man die Geradlinigkeit eventuell vernachlässigen. Der Schreitroboter kann sich dann mit Hilfe der Kamera einen Fixpunkt suchen und auf diesen zulaufen. Wenn dann Abweichungen in der Geradlinigkeit auftreten, kann der Schreitroboter sie selbst ausgleichen, oder sich immer wieder neu auf diesen Fixpunkt ausrichten.

Interessant wäre sicherlich auch eine Fortbewegung im reellen und rauhen Gelände.

Eine Erweiterung könnten auch Sensoren um den Schreitroboter herum sein, die vor dem Kontakt mit Gegenständen warnen und diesen somit vermeiden könnten.

Um ein kontinuierliches Arbeiten mit dem Schreitroboter zu gewährleisten, könnte man ihn etwas robuster konstruieren.

Dank gilt meinen beiden Betreuern, Prof. Dr. H. Loose, und dem wissenschaftlichen Mitarbeiter Dipl.-Inform. I. Boersch für die immer freundliche und hilfsbereite Unterstützung.

Norman Krause

Literaturverzeichnis

[1] Harald Loose, The walking robot “SimengDolores” a project in education in Mechatronics, 2001.

[2] Song and Waldorn, Machines That Walk, The MIT Press Cambridge, Massachusetts 1989.

[3] Die Grosse Bertelsmann Lexikothek, Bertelsmann Lexikothek Verlag, 1991.

[4] P. Profos / T. Pfeifer, Grundlagen der Meßtechnik, R. Oldenbourg Verlag, 1997.

[5] Armin Schöne, Meßtechnik, Springer Verlag, 1997.

[6] H. – J. Gevatter, Handbuch der Meß- und Automatisierungstechnik, Springer Verlag, 1999.

[7] Thomas Bräunl, Eyebot Online Dokumentation, WWW, 1999. http://www.ee.uwa.edu.au/~braunl/eyebot/

[8] Frank Dieterle, Statistik Tutorial, WWW, 2001. http://barolo.ipc.uni-tuebingen.de/pharma/2/2.1/standardabweichung.html

[9] Frank Dieterle, Statistik Tutorial, WWW, 2001. http://barolo.ipc.uni-tuebingen.de/pharma/2/2.1/streumass_varianz.html

[6]

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 2.1 Foto “SimengDolores“ 5
Abbildung 2.2 Ansicht von unten 6
Abbildung 2.3 Bein in X-Y – Ebene [1] 7
Abbildung 2.4 Bein in Y-Z _ Ebene[1] 7
Abbildung 2.5 EyeBot 9
Abbildung 2.6 Fußansicht Zeichnung 10
Abbildung 2.7 Fußansicht Foto 10
Abbildung 2.8 Wheatstonesche Brückenschaltung für Dehnungsmeßstreifen 10
Abbildung 2.9 Skizze zur Berechnung des Schwerpunktes 11
Abbildung 3.1 Beinbezeichnungen des Schreitroboters 15
Abbildung 3.2 Aus Stabilitätsgründen erlaubte Beinstellungen 15
Abbildung 3.3 Aus Stabilitätsgründen nicht erlaubte Beinstellungen 16
Abbildung 3.4 Schrittfolge beim Tripod Gait 18
Abbildung 3.5 Gaitdiagramme des Tripod Gait (Quelle Song und Waldorn) 19
Abbildung 3.6 Gaitdiagramme des Equal-Phase Gait (Quelle Song und Waldorn) 20
Abbildung 3.7 Bewegungsablauf beim Equal-Phase Gait 21
Abbildung 3.8 Bewegungsablauf des Follow-the-Leader Gaits 22
Abbildung 3.9 Bewegungsablauf beim Turn 23
Abbildung 3.10 Bewegungsablauf beim Swing mit Tripod Gait als Gangart 24
Abbildung 5.1 Versuchsgitter 29
Abbildung 5.2 Schaltbild zum Messen des Ladezustandes der Akkumulatoren 30
Abbildung 5.3 Strommessungsschaltbild 30
Abbildung 5.4 Spannungsmeßschaltung 31
Abbildung 5.5 Ausgangsstellung beim Messen von Abweichungen 32
Abbildung 5.6 Skizze zur Berechnung der Abweichung 32
Abbildung 5.7 Swing Left 35
Abbildung 5.8 Swing Right 35
Abbildung 5.9 Benötigte Zeit beim Tripod Gait mit einer viertel Schrittweite 37
Abbildung 5.10 Abweichungen im Tripod Gait mit einer viertel Schrittweite 37
Abbildung 5.11 Benötigte Zeit beim Tripod Gait mit einer halben Schrittweite 38
Abbildung 5.12 Abweichungen im Tripod Gait mit einer halben Schrittweite 38
Abbildung 5.13 Benötigte Zeit beim Tripod Gait mit einer dreiviertel Schrittweite 39
Abbildung 5.14 Abweichungen im Tripod Gait mit einer dreiviertel Schrittweite 40
Abbildung 5.15 Benötigte Zeit beim Follow-the-Leader Gait mit einer viertel Schrittweite 41

Abbildung 5.16 Abweichungen beim Follow-the-Leader Gait mit einer viertel Schrittweite ... 42
Abbildung 5.17 Benötigte Zeit beim Follow-the-Leader Gait mit einer halben Schrittweite ... 43
Abbildung 5.18 Abweichungen beim Follow-the-Leader Gait mit einer halben Schrittweite .. 43
Abbildung 5.19 Benötigte Zeit beim Follow-the-Leader Gait mit einer dreiviertel Schrittweite ... 44
Abbildung 5.20 Abweichungen beim Follow-the-Leader Gait mit einer dreiviertel Schrittweite ... 44
Abbildung 5.21 Benötigte Zeit beim Equal-Phase Gait mit kleiner Schrittweite ... 46
Abbildung 5.22 Abweichungen beim Equal-Phase Gait mit einer kleinen Schrittweite ... 46
Abbildung 5.23 Benötigte Zeit im Equal-Phase Gait mit einer mittleren Schrittweite ... 47
Abbildung 5.24 Abweichungen beim Equal-Phase Gait mit einer mittleren Schrittweite ... 48
Abbildung 5.25 Benötigte Zeit beim Equal-Phase Gait mit einer großen Schrittweite ... 49
Abbildung 5.26 Abweichungen beim Equal-Phase Gait mit einer großen Schrittweite ... 49
Abbildung 5.27 Benötigte Zeit im Swing Left bei einer mittleren und einer kleinen Schrittweite ... 51
Abbildung 5.28 Benötigte Strecken im Swing Left bei einer mittleren und einer kleinen Schrittweite ... 51
Abbildung 5.29 Benötigte Zeit im Swing Right bei einer mittleren und einer kleinen Schrittweite ... 52
Abbildung 5.30 Benötigte Strecken im Swing Right bei einer mittleren und einer kleinen Schrittweite ... 52
Abbildung 5.31 Benötigte Zeit im Swing Left bei einer dreiviertel und einer viertel Schrittweite ... 53
Abbildung 5.32 Benötigte Strecken im Swing Left bei einer dreiviertel und einer viertel Schrittweite ... 54
Abbildung 5.33 Benötigte Zeit im Swing Right bei einer großen und einer kleinen Schrittweite ... 55
Abbildung 5.34 Benötigte Strecken im Swing Right bei einer großen und einer kleinen Schrittweite ... 55
Abbildung 5.35 Benötigte Zeit im Swing Left bei einer großen und einer mittleren Schrittweite ... 56
Abbildung 5.36 Benötigte Strecken im Swing Left bei einer großen und einer mittleren Schrittweite ... 56
Abbildung 5.37 Benötigte Zeit im Swing Right bei einer großen und einer mittleren Schrittweite ... 57
Abbildung 5.38 Benötigte Strecken im Swing Right bei einer großen und einer mittleren Schrittweite ... 58

Abbildung 5.39 Benötigte Zeit beim Turn mit einer viertel Schrittweite 59
Abbildung 5.40 Abweichungen beim Turn mit einer viertel Schrittweite 59
Abbildung 5.41 Benötigte Zeit beim Turn mit einer halben Schrittweite 60
Abbildung 5.42 Abweichungen beim Turn mit einer halben Schrittweite 61
Abbildung 5.43 Benötigte Zeit beim Turn mit einer dreiviertel Schrittweite 62
Abbildung 5.44 Abweichungen beim Turn mit einer dreiviertel Schrittweite 62

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1 Berechnung des Schwerpunktes S_0 12
Tabelle 3.1 Charakterisierte Gangarten (Quelle Song und Waldorn) 13
Tabelle 5.1 Berechnete Werte des Tripod Gait mit einer dreiviertel Schrittweite 38
Tabelle 5.2 Berechnete Werte des Tripod Gait mit einer halben Schrittweite 39
Tabelle 5.3 Berechnete Werte des Tripod Gait mit einer dreiviertel Schrittweite 40
Tabelle 5.4 Berechnete Werte des Follow-the-Leader Gait mit einer viertel Schrittweite..... 42
Tabelle 5.5 Berechnete Werte des Follow-the-Leader Gait mit einer halben Schrittweite 44
Tabelle 5.6 Berechnete Werte des Follow-the-Leader Gait mit einer dreiviertel Schrittweite 45
Tabelle 5.7 Berechnete Werte des Equal-Phase Gait mit einer kleinen Schrittweite 47
Tabelle 5.8 Berechnete Werte des Equal-Phase Gait mit einer mittleren Schrittweite..... 48
Tabelle 5.9 Berechnete Werte des Equal-Phase Gait mit einer großen Schrittweite 50
Tabelle 5.10 Berechnete Werte des Swing Left bei einer mittleren und einer kleinen Schrittweite 52
Tabelle 5.11 Berechnete Werte des Swing Right bei einer mittleren und einer kleinen Schrittweite 53
Tabelle 5.12 Berechnete Werte des Swing Left mit einer großen und kleinen Schrittweite .. 54
Tabelle 5.13 Berechnete Werte des Swing Right mit einer großen und kleinen Schrittweite 56
Tabelle 5.14 Berechnete Werte des Swing Left mit einer großen und mittleren Schrittweite 57
Tabelle 5.15 Berechnete Werte des Swing Right mit einer großen und mittleren Schrittweite 58
Tabelle 5.16 Berechnete Werte des Turn mit einer viertel Schrittweite..... 60
Tabelle 5.17 Berechnete Werte des Turn bei einer halben Schrittweite..... 61
Tabelle 5.18 Berechnete Werte des Turn bei einer dreiviertel Schrittweite..... 63
Tabelle 5.19 Übersicht der geeignetesten Schrittweiten mit den dazugehörigen Mittelwerten 64

Anhang

Umrechnungstabelle von Zentimeter in Grad A1
Tabellen zur Versuchsdurchführung A2
Diagramme zum Swing Left und Swing Right..... A3
Quellcode A4

Anhang 1 Umrechnungstabelle von Zentimeter in Grad

Zentimeter	Grad
0,5	0,29
1	0,57
1,5	0,86
2	1,15
2,5	1,43
3	1,71
3,5	2
4	2,29
4,5	2,58
5	2,86
5,5	3,15
6	3,43
6,5	3,72
7	4
7,5	4,29
8	4,57
8,5	4,86
9	5,14
9,5	5,42
10	5,71
10,5	5,99
11	6,28
11,5	6,56
12	6,84
12,5	7,13
13	7,41
13,5	7,69
14	7,97
14,5	8,25
15	8,53
15,5	8,81
16	9,09
16,5	9,37
17	9,65
17,5	9,93
18	10,2
18,5	10,48
19	10,76
19,5	11,03
20	11,31
20,5	11,59
21	11,86
21,5	12,13
22	12,41
22,5	12,68
23	12,95
23,5	13,22
24	13,49
24,5	13,77
25	14,04

Anhang 2 Tabellen zur Versuchsdurchführung

Meßwerte des Tripod Gait mit einer viertel Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
1	241,00	5,71	248,16	4,57
2	242,46	4,57	249,14	4,29
3	239,67	2,58	248,72	4,86
4	240,31	6,84	249,36	4,14
5	243,04	5,42	250,43	3,72
6	240,93	4,29	249,64	4,57
7	242,91	4,57	251,61	6,28
8	241,37	2,86	250,42	5,42
9	241,16	3,43	249,81	5,42
10	242,16	3,72	249,68	5,71

Meßwerte des Tripod Gait mit einer halben Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
1	36,17	0,00	38,97	1,15
2	36,45	2,29	38,54	0,00
3	35,89	0,00	38,64	-0,86
4	36,32	-0,57	39,02	0,29
5	35,94	-1,43	38,46	2,00
6	35,96	0,00	38,12	-2,58
7	36,02	-1,71	38,29	-3,15
8	35,76	0,00	38,31	0,00
9	36,29	0,00	38,44	1,43
10	36,08	0,00	39,06	0,86

Meßwerte des Tripod Gait mit einer dreiviertel Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
1	37,09	-5,14	37,73	2,29
2	36,84	4,00	37,86	4,00
3	37,27	6,56	38,02	-6,28
4	35,93	-2,29	37,92	-5,42
5	36,59	3,72	37,89	-2,58
6	36,36	4,29	37,69	3,72
7	37,16	-1,15	37,74	0,57
8	36,74	-2,00	37,65	-2,86
9	36,38	3,72	37,76	0,00
10	36,00	3,43	38,04	-1,71

Meßwerte des Follow-the-Leader Gait mit einer viertel Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
1	241,00	5,71	248,16	4,57
2	242,46	4,57	249,14	4,29
3	239,67	2,58	248,72	4,86
4	240,31	6,84	249,36	4,14
5	243,04	5,42	250,43	3,72
6	240,93	4,29	249,64	4,57
7	242,91	4,57	251,61	6,28
8	241,37	2,86	250,42	5,42
9	241,16	3,43	249,81	5,42
10	242,16	3,72	249,68	5,71

Meßwerte des Follow-the-Leader Gait mit einer halben Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
1	142,00	-9,09	147,10	-4,00
2	142,80	-4,57	149,36	-4,86
3	139,98	2,29	148,47	-7,41
4	141,46	-3,15	146,76	-5,99
5	142,52	-3,43	147,91	-4,57
6	140,19	-4,00	148,39	3,72
7	140,03	3,15	147,54	-1,43
8	141,74	4,57	146,97	-6,28
9	142,39	-5,42	148,72	4,29
10	141,41	-6,56	148,65	-3,15

Meßwerte des Follow-the-Leader Gait mit einer dreiviertel Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
1	136,18	3,72	138,01	0,00
2	133,98	-2,58	136,43	-1,15
3	133,24	1,71	137,23	0,86
4	135,21	3,15	138,17	-1,71
5	136,02	-1,43	135,89	-0,86
6	134,54	1,43	137,03	0,00
7	134,39	2,29	136,51	2,00
8	133,67	2,00	135,22	-1,43
9	135,12	1,15	138,46	-0,57
10	136,09	0,86	136,19	2,29

Meßwerte des Equal-Phase Gait mit einer kleinen Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
1	323,86	11,86	325,31	12,31
2	324,42	10,76	327,26	11,03
3	322,91	11,59	325,41	11,31
4	321,63	9,93	326,70	12,13
5	323,23	10,48	328,41	11,86
6	323,47	10,20	325,29	10,20
7	324,96	12,13	324,99	12,41
8	321,84	11,31	327,17	11,59
9	325,17	7,97	325,67	9,09
10	322,31	11,03	327,59	10,76

Meßwerte des Equal-Phase Gait mit einer mittleren Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
1	193,59	7,97	193,12	4,57
2	192,79	7,13	194,01	2,29
3	191,94	7,41	193,41	4,29
4	193,32	8,25	192,50	3,72
5	193,00	7,69	191,83	4,57
6	194,07	6,84	193,29	3,15
7	192,84	7,97	193,96	4,86
8	193,46	8,25	194,27	4,00
9	194,12	7,69	193,96	4,86
10	193,93	7,13	193,73	2,86

Meßwerte des Equal-Phase Gait mit einer großen Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
1	156,01	6,28	157,21	9,09
2	156,24	7,69	158,43	6,84
3	155,83	5,42	157,93	8,81
4	156,00	6,56	159,04	9,93
5	154,71	6,84	158,61	8,25
6	155,59	4,86	157,47	7,13
7	155,33	7,13	157,56	7,97
8	156,09	4,57	159,26	9,37
9	156,12	5,71	156,98	8,25
10	156,34	5,99	157,64	9,09

Meßwerte des Swing Left mit einer mittleren und kleinen Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:	U < 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:
1	183,73	105,50	118,50	181,74	102,50	109,50
2	191,07	82,00	79,00	185,50	110,50	107,00
3	181,28	102,5	100,00	182,91	89,00	96,50
4	189,84	94,00	106,50	190,14	107,50	114,50
5	192,19	104,00	112,00	186,86	98,50	83,00
6	186,00	95,50	116,00	184,29	92,00	102,50
7	190,35	112,50	103,50	189,40	84,50	89,00
8	187,21	108,00	113,50	185,19	111,50	102,50
9	183,93	107,50	104,00	182,68	103,50	104,50
10	188,64	101,50	115,50	189,00	86,00	97,50

Meßwerte des Swing Left mit einer großen und kleinen Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:	U < 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:
1	207,14	151,50	157,00	208,23	152,50	161,50
2	209,65	150,00	162,50	210,82	159,00	157,50
3	204,30	148,50	154,50	210,63	156,50	160,00
4	206,00	152,50	163,00	205,18	149,50	153,50
5	207,39	147,50	153,50	207,37	152,00	159,50
6	211,04	154,00	165,00	209,47	155,00	154,50
7	205,92	149,00	154,00	206,12	153,50	162,00
8	206,13	151,00	160,00	212,79	162,50	164,00
9	207,72	153,50	153,50	208,93	150,50	159,50
10	209,49	152,00	158,00	211,31	158,50	167,00

Meßwerte des Swing Left mit einer großen und mittleren Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:	U < 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:
1	186,95	131,00	145,50	175,46	129,50	136,50
2	173,24	117,00	118,00	182,92	146,00	127,50
3	175,67	145,50	128,00	179,21	124,50	129,00
4	177,03	109,00	142,50	185,39	116,50	138,50
5	184,19	124,50	138,50	176,68	124,00	128,50
6	175,38	129,50	127,50	187,57	139,00	142,50
7	180,41	123,00	130,50	182,30	131,50	126,50
8	179,09	142,00	134,50	178,49	143,50	145,00
9	183,64	136,50	144,00	182,84	119,00	124,50
10	174,96	117,50	121,00	179,94	138,50	127,00

Meßwerte des Swing Right mit einer mittleren und kleinen Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:	U < 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:
1	230,20	91,00	134,50	234,51	112,50	159,50
2	228,47	112,00	155,00	232,36	113,00	161,50
3	234,04	97,00	153,50	229,67	93,50	137,00
4	229,43	105,50	146,00	231,39	98,50	142,50
5	231,65	89,00	137,50	237,04	109,50	170,50
6	226,51	102,50	149,00	233,71	112,50	152,00
7	228,93	96,50	132,50	229,98	99,50	148,50
8	235,72	114,00	162,50	236,42	116,50	164,50
9	232,12	99,50	143,00	228,83	100,00	149,00
10	233,06	111,50	148,50	234,16	104,50	153,50

Meßwerte des Swing Right mit einer großen und kleinen Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:	U < 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:
1	256,38	149,50	163,50	258,41	152,50	163,00
2	252,21	143,00	164,00	261,23	154,50	164,50
3	253,49	144,50	162,50	256,12	149,50	161,00
4	248,85	141,50	158,50	255,29	149,00	159,50
5	249,69	141,00	160,00	262,03	158,50	162,50
6	254,73	148,50	161,00	258,94	154,00	163,00
7	250,86	139,50	167,00	254,17	150,50	158,50
8	258,47	151,50	167,00	259,14	157,50	169,50
9	249,54	143,50	159,50	261,39	159,00	171,50
10	253,62	145,00	164,50	256,20	151,50	166,00

Meßwerte des Swing Right mit einer großen und mittleren Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:	U < 5,9 V	Weg in cm:	Weg in cm:
1	238,07	176,00	175,00	242,19	184,50	186,00
2	241,43	182,50	184,00	240,38	181,50	179,00
3	236,36	173,00	171,50	239,47	176,50	178,50
4	239,27	177,50	176,00	246,21	190,00	186,50
5	245,61	186,50	188,00	238,43	177,50	179,00
6	237,92	178,00	178,50	245,92	187,50	184,50
7	239,59	182,00	180,00	241,41	182,00	183,50
8	242,12	183,50	185,50	243,69	183,50	182,50
9	241,69	180,00	182,00	239,28	178,50	178,00
10	238,81	176,50	177,50	245,76	190,50	192,50

Meßwerte des Turn mit einer kleinen Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
1	99,42	1,50	102,00	2,00
2	100,94	2,50	104,39	2,50
3	101,31	1,00	102,14	2,00
4	99,84	2,00	104,02	2,00
5	101,72	1,50	102,67	2,00
6	100,22	2,50	103,86	2,50
7	100,00	2,00	102,92	1,50
8	98,56	1,50	105,19	2,00
9	102,09	1,50	105,23	2,00
10	100,76	2,00	102,78	1,50

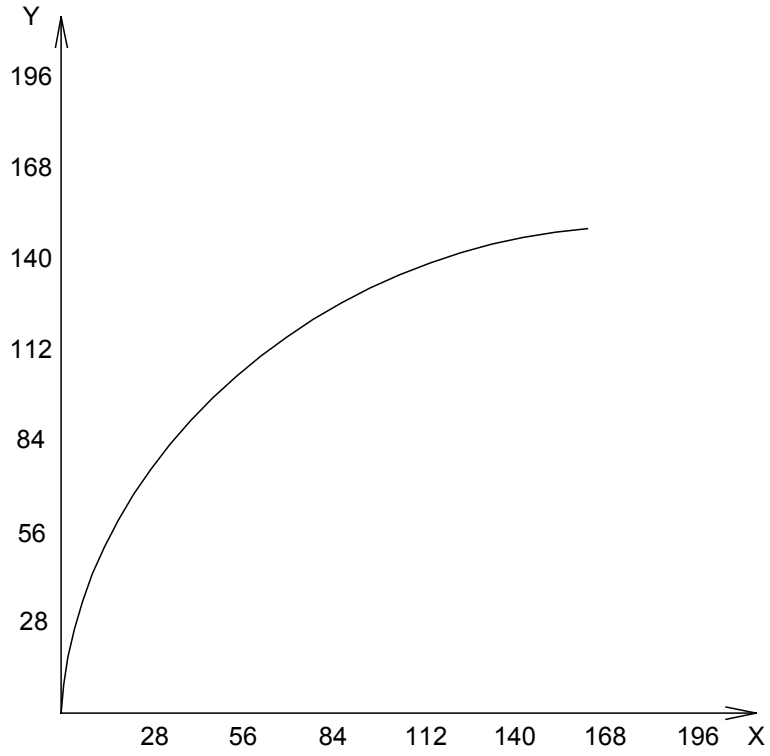
Meßwerte des Turn mit einer mittleren Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
1	51,33	2,50	53,26	2,00
2	51,46	1,50	55,34	1,50
3	53,39	2,50	54,76	2,50
4	50,80	3,00	53,18	2,00
5	52,65	1,50	53,85	1,50
6	50,94	2,50	54,21	1,50
7	53,26	2,00	55,63	2,50
8	52,78	2,50	55,43	2,50
9	51,06	1,50	53,91	2,00
10	52,12	2,00	54,12	1,50

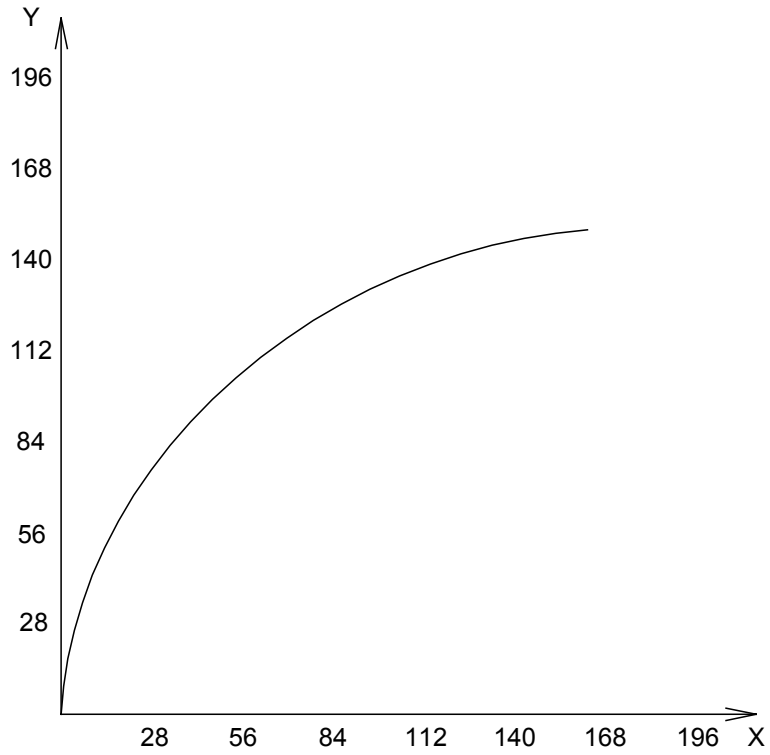
Meßwerte des Turn mit einer großen Schrittweite

Versuche	U > 5,9 V	Abweichung	U < 5,9 V	Abweichung
1	52,22	1,50	54,39	1,00
2	50,84	2,00	52,26	2,00
3	51,67	1,00	54,08	1,00
4	51,20	1,50	53,31	1,50
5	50,79	1,50	52,21	2,50
6	52,18	1,00	54,16	1,50
7	51,49	1,50	54,29	2,00
8	52,43	2,00	52,87	2,00
9	51,38	1,50	52,94	1,50
10	52,00	1,50	53,13	1,00

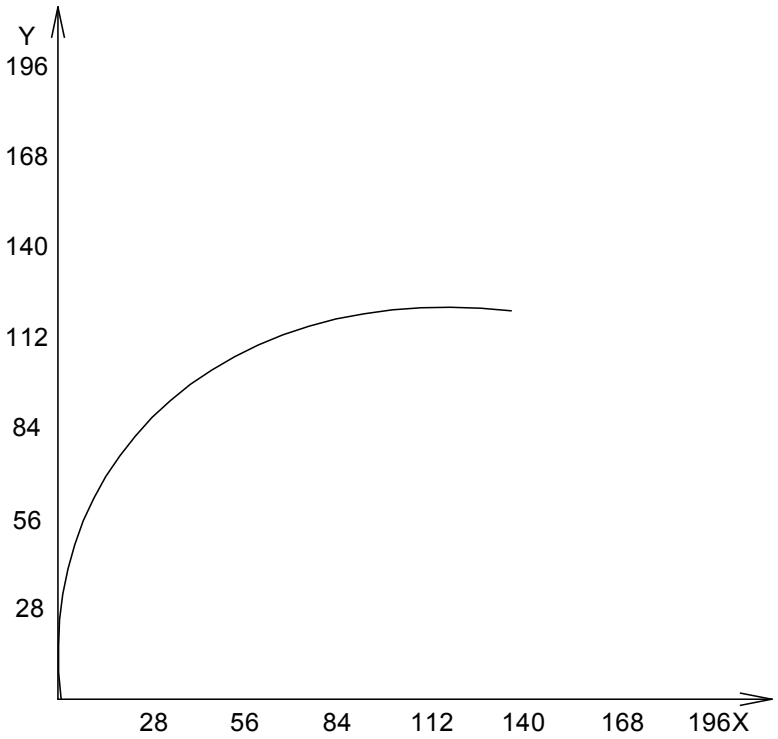
Anhang 3 Diagramme zum Swing Left und Swing Right



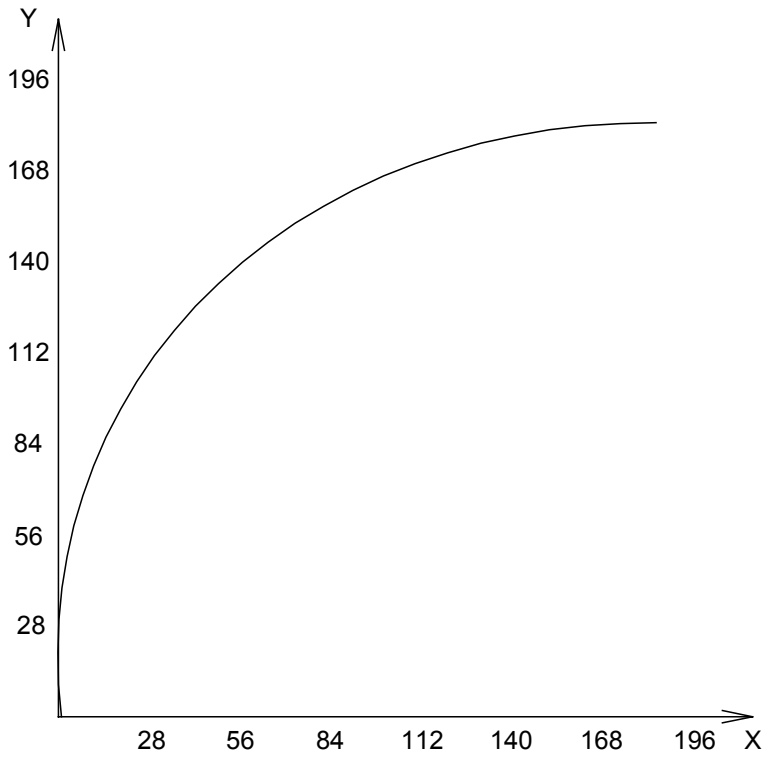
Swing Left bei einer dreiviertel und viertel Schrittweite



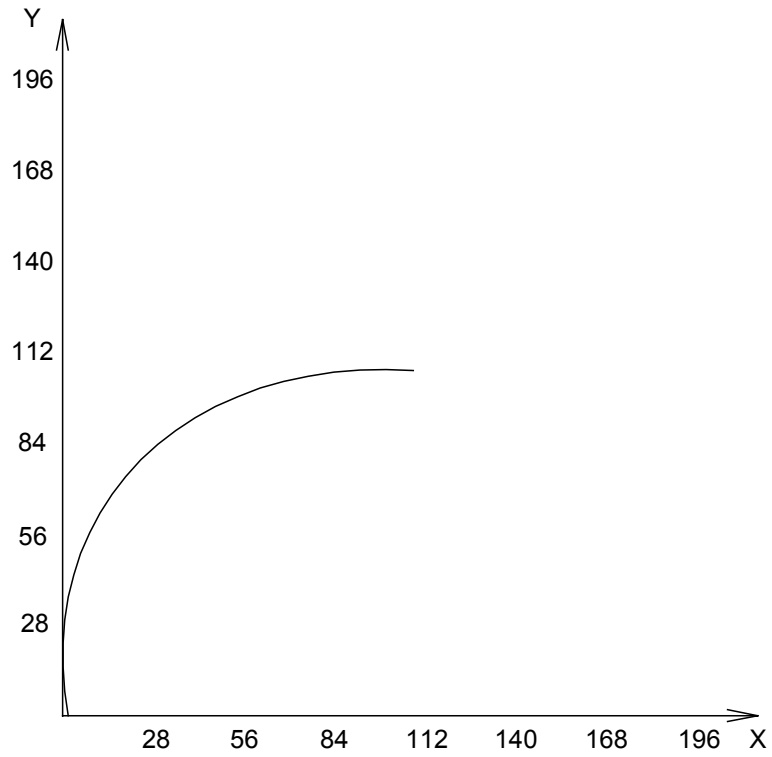
Swing Right bei einer dreiviertel und viertel Schrittweite



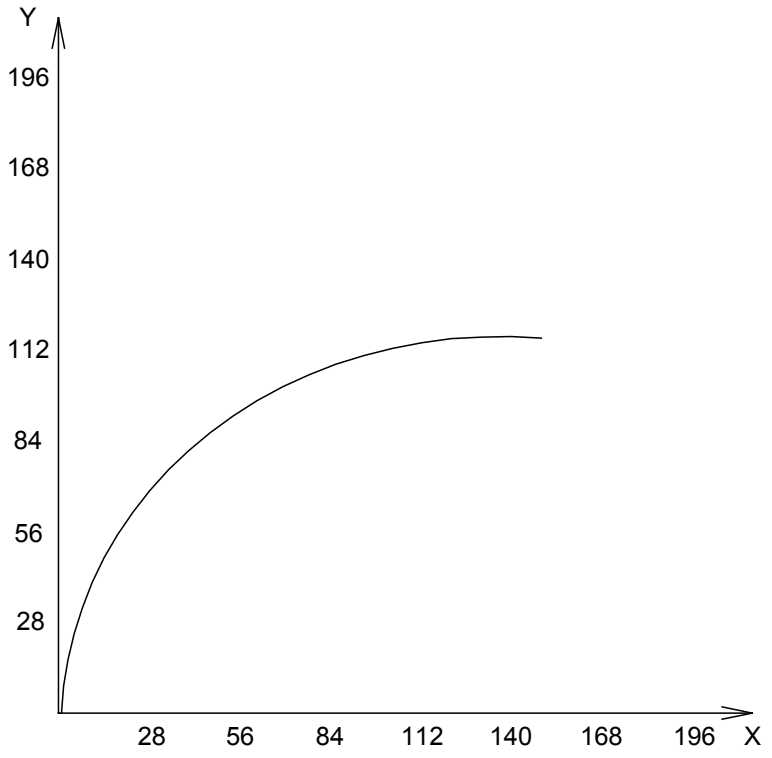
Swing Left bei einer dreiviertel und halben Schrittweite



Swing Right bei einer dreiviertel und halben Schrittweite



Swing Left bei einer halben und viertel Schrittweite



Swing Right bei einer halben und viertel Schrittweite

Anhang 4 Quellcode

```
#include "librobi/librobi.h"
#include "librobi/protos.h"
#include "keys.h"
#include "lcd.h"
#include "types.h"
#include <stdio.h>
#include <string.h>

#define NBOFSERVOS 12
#define FAKTOR          256/180
#define MYWAIT          50
#define MINWAIT                 35
/* Index nach Nummerierung der Servos */
#define L               0
#define R               1
#define L1              2
#define L2              3
#define L3              6
#define R1              1
#define R2              4
#define R3              5

/* Tabelle der Startpositionen der Servos*/
/*              r1s  r1l   l1s l1l  l2s  l2l    r2s r2l   r3s  r3l   l3s    l3l */
int zeros[12]={120,144,128,96,136,112,128,136,128,136,120,136};
int servohandle[12];        /*wird genutzt zum Aufruf von den Servos 0 - 11 aus Funktionen*/
int nrleg[6] = {L1,L2,L3,R1,R2,R3};
int status[12];
int minlift = -70*FAKTOR, maxlift = 70*FAKTOR,
        minswing = -42*FAKTOR, maxswing = 42*FAKTOR;
int stride = 84*FAKTOR, stroke = 63*FAKTOR, stroke1 = 42*FAKTOR, stroke2 = 21*FAKTOR, lift = 60*FAKTOR;
int waittime = MYWAIT;
char z,zzz[10];             /*zum auslesen der Tasten auf dem Board (1-4)      */
char * zz = &zzz[0];
int j;

const int FEET_POS6[] = {70, 42, 14, -14, -42, -70};
struct active_feet  {
    int number;
    int site;
        };
```

```
struct active_feet af;

char *inttostr(int y)
{

 switch(y/1000)
  {
     case 1: strcpy(zz,"1"); break;
     case 2: strcpy(zz,"2"); break;
     case 3: strcpy(zz,"3"); break;
     case 4: strcpy(zz,"4"); break;
     case 5: strcpy(zz,"5"); break;
     case 6: strcpy(zz,"6"); break;
     case 7: strcpy(zz,"7"); break;
     case 8: strcpy(zz,"8"); break;
     case 9: strcpy(zz,"9"); break;
     default:strcpy(zz,"") ; break;
  }

 switch((y%1000)/100)
  {  case 0: strcat(zz,"0"); break;
     case 1: strcat(zz,"1"); break;
     case 2: strcat(zz,"2"); break;
     case 3: strcat(zz,"3"); break;
     case 4: strcat(zz,"4"); break;
     case 5: strcat(zz,"5"); break;
     case 6: strcat(zz,"6"); break;
     case 7: strcat(zz,"7"); break;
     case 8: strcat(zz,"8"); break;
     case 9: strcat(zz,"9"); break;
  }

 switch(((y%1000)%100)/10)
  {
     case 0: strcat(zz,"0"); break;
     case 1: strcat(zz,"1"); break;
     case 2: strcat(zz,"2"); break;
     case 3: strcat(zz,"3"); break;
     case 4: strcat(zz,"4"); break;
     case 5: strcat(zz,"5"); break;
     case 6: strcat(zz,"6"); break;
     case 7: strcat(zz,"7"); break;
     case 8: strcat(zz,"8"); break;
     case 9: strcat(zz,"9"); break;
```

```
  }
 switch(((y%1000)%100)%10)
  {
     case 0: strcat(zz,"0"); break;
     case 1: strcat(zz,"1"); break;
     case 2: strcat(zz,"2"); break;
     case 3: strcat(zz,"3"); break;
     case 4: strcat(zz,"4"); break;
     case 5: strcat(zz,"5"); break;
     case 6: strcat(zz,"6"); break;
     case 7: strcat(zz,"7"); break;
     case 8: strcat(zz,"8"); break;
     case 9: strcat(zz,"9"); break;
  }
 return(zz);
}

/*********************************************************************/
/*************** Initialisieren der Servos ************************/
/*********************************************************************/
void initServos(void)
{
   LCDClear();
   LCDMode(SCROLLING|NOCURSOR);
/*   setvbuf(stdout,NULL,_IONBF,0);
   setvbuf(stdin,NULL,_IONBF,0);*/
   /* Initialisieren der Sensoren */
   servohandle[0]=SERVOInit(SERVO0);
   servohandle[1]=SERVOInit(SERVO1);
   servohandle[2]=SERVOInit(SERVO2);
   servohandle[3]=SERVOInit(SERVO3);
   servohandle[4]=SERVOInit(SERVO4);
   servohandle[5]=SERVOInit(SERVO5);
   servohandle[6]=SERVOInit(SERVO6);
   servohandle[7]=SERVOInit(SERVO7);
   servohandle[8]=SERVOInit(SERVO8);
   servohandle[9]=SERVOInit(SERVO9);
   servohandle[10]=SERVOInit(SERVO10);
   servohandle[11]=SERVOInit(SERVO11);
}

/*********************************************************************/
/*************** -> Nullstellung ohne Kontakt *********************/
/*********************************************************************/
void initialize(void)
```

```
{
  int i;
  for (i=0; i < 12; i++)
  {
            SERVOSet(servohandle[i],zeros[i]);
            status[i] = zeros[i];
  }
 /* refresha();*/
}

/*************************************************************************/
/******************** Abschalten der Servos ***************************/
/*************************************************************************/
void release(void)
{
 /*LCDClear();*/
 SERVORelease(servohandle[0]);
 SERVORelease(servohandle[1]);
 SERVORelease(servohandle[2]);
 SERVORelease(servohandle[3]);
 SERVORelease(servohandle[4]);
 SERVORelease(servohandle[5]);
 SERVORelease(servohandle[6]);
 SERVORelease(servohandle[7]);
 SERVORelease(servohandle[8]);
 SERVORelease(servohandle[9]);
 SERVORelease(servohandle[10]);
 SERVORelease(servohandle[11]);
}

/*************************************************************************/
/***** Ermitteln der Seite und Nummer eines Beines aus Beinnummer *****/
/*************************************************************************/
int seite(int nrofleg)
{
          if (nrofleg == 2 || nrofleg == 3 || nrofleg == 6) return L;
          else                          return R;
}

int nummer(int nrofleg)
{
          if (nrofleg < 3)              return 0;
          else if (nrofleg < 5)         return 1;
                    else                                  return 2;
}
```

```
/*********************************************************************/
/* Hub eines Beines (Seite, Nummer, Zielwinkel) */
/*   Korrektur des Winkels: rechts -> -angle */
/*   hoch +, runter - */
/*********************************************************************/

void liftleg(int seite,int nrofleg,int angle)
{
 int nr;

 /***** weil motoren umgebaut *****/
 if (nrofleg ==2) angle = -angle;
 /* ------------------------------ */

 if (angle < minlift) angle = minlift;
 else if (angle > maxlift) angle = maxlift;
 if (seite)  {          angle = -angle;   nrofleg +=3;}
 nr = 2*nrleg[nrofleg]-1;
 status[nr] = zeros[nr] + angle;
 SERVOSet(servohandle[nr],status[nr]);
}

/*********************************************************************/
/* Transfer eines Beines (Seite, Nummer, Zielwinkel) */
/*   Korrektur des Winkels: rechts -> -angle */
/*   vorwärts +, rückwärts - */
/*********************************************************************/

void swingleg(int seite,int nrofleg, int angle)
{
 int nr;
 if (angle < minswing) angle = minswing;
 else if (angle > maxswing) angle = maxswing;
 if (seite)  {          angle = -angle;   nrofleg +=3;}
 nr = 2*nrleg[nrofleg]-2;
 status[nr] = zeros[nr] + angle;
 SERVOSet(servohandle[nr],status[nr]);
}

/*********************************************************************/
/*setzt alle Beine zurück in die Nullstellung*/
void resetleg(int seite,int nrofleg,int swingangle)
{
  liftleg(seite,nrofleg,lift);                                  /*hebe das Bein*/
```

```
  OSWait(MINWAIT);                                  /*Eine erzwungene Pause*/
  swingleg(seite,nrofleg,swingangle);               /*schwinge das Bein*/
  OSWait(MINWAIT);                                  /*Eine erzwungene Pause*/
  liftleg(seite,nrofleg,0);                         /*senke das Bein*/
  OSWait(waittime);                                 /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*************************************************************************/
/*************** -> Nullstellung mit Kontakt *************************/
/*************************************************************************/
void reset(void)
{
  int i;
        for (i=0; i<3; i++)
        {
                resetleg(L,i,0);                    /*Aufruf der Funktion resetleg*/
                resetleg(R,i,0);                    /*Aufruf der Funktion resetleg*/
   }
}
/*************************************************************************/
void heben1()
/*Heben von L1,L3,R2 */
{
        liftleg(L,0,lift);                          /*hebe das Bein L1*/
        liftleg(R,1,lift);                          /*hebe das Bein R2*/
        liftleg(L,2,lift);                          /*hebe das Bein L3*/
        OSWait(MINWAIT);                            /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*************************************************************************/
void heben2()
/*Heben von R1,R3,L2 */
{
        liftleg(R,0,lift);                          /*hebe das Bein R1*/
        liftleg(L,1,lift);                          /*hebe das Bein L2*/
        liftleg(R,2,lift);                          /*hebe das Bein R3*/
        OSWait(MINWAIT);                            /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*************************************************************************/
void schwenkenwave1()
/*Schwenken von L1,L3,R2 */
{
        swingleg(L,0,-stroke);                      /*schwenke das Bein L1*/
        swingleg(R,1,-stroke);                      /*schwenke das Bein R2*/
```

```
        swingleg(L,2,-stroke);                  /*schwenke das Bein L3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*************************************************************************/
void schwenkenwave2()
/*Schwenken von R1,R3,L2 */
{
        swingleg(R,0,-stroke);                  /*schwenke das Bein R1*/
        swingleg(L,1,-stroke);                  /*schwenke das Bein L2*/
        swingleg(R,2,-stroke);                  /*schwenke das Bein R3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*************************************************************************/
void senken1()
/*Senken von L1,L3,R2 */
{
        liftleg(L,0,0);                         /*senke das Bein L1*/
        liftleg(R,1,0);                         /*senke das Bein R2*/
        liftleg(L,2,0);                         /*senke das Bein L3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*************************************************************************/
void senken2()
/*Senken von R1,R3,L2 */
{
        liftleg(R,0,0);                         /*senke das Bein R1*/
        liftleg(L,1,0);                         /*senke das Bein L2*/
        liftleg(R,2,0);                         /*senke das Bein R3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*************************************************************************/
/********************** WaveGait Tripod ************************/
/*************************************************************************/
/*In dieser Funktion wird der Rumpf des Schreitroboters nach vorn bewegt. Die Beine R1, R3 und L2 befinden
sich hier in der Stützphase.*/
tripodvor1()
{
        swingleg(R,0,stroke);                   /*schwinge das Bein R1*/
        swingleg(R,2,stroke);                   /*schwinge das Bein L2*/
        swingleg(L,1,stroke);                   /*schwinge das Bein R3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
```

```
}

/*********************************************************************/
/*In dieser Funktion wird der Rumpf des Schreitroboters nach vorn bewegt. Die Beine L1, L3 und R2 befinden
sich hier in der Stützphase.*/
tripodvor2()
{
        swingleg(L,0,stroke);                   /*schwinge das Bein L1*/
        swingleg(R,1,stroke);                   /*schwinge das Bein R2*/
        swingleg(L,2,stroke);                   /*schwinge das Bein L3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*********************************************************************/
/*Dieses ist die Funktion die im Menü bei der Wahl des Tripod Gait aufgerufen wird. Ruft die Funktionen auf, die
für diese Gangart notwendig sind */
void tripod()
{
int i;
  for (i=0; i<45; i++)
        {
/*      heben1();                               /*ruft die Funktion heben1 auf*/
        schwenkenwave1();                       /*ruft die Funktion schwenkenwave1 auf*/
        tripodvor1();                           /*ruft die Funktion tripodvor1 auf*/
        senken1();                              /*ruft die Funktion senken1 auf*/
        heben2();                               /*ruft die Funktion heben2 auf*/
        schwenkenwave2();                       /*ruft die Funktion schwenkenwave2 auf*/
        tripodvor2();                           /*ruft die Funktion tripodvor2 auf*/
        senken2();                              /*ruft die Funktion senken2 auf*/
        OSWait(MYWAIT);                         /*Erzwungene Pause*/
        }
}

/*********************************************************************/
/******************** Follow the Leader gait*************************/
/*********************************************************************/
/*In dieser Funktion werden alle Beine angehoben, nach vorn bewegt und wieder abgesetzt. Dieses passiert alles
nacheinander, wenn ein Bein sich wieder in der Stützphase befindet ist das nächste dran*/
void ftlbeinsetzen()
{
        liftleg(L,0,lift);                      /*hebt das Bein L1*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        swingleg(L,0,-stroke);                  /*schwingt das Bein L1*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(L,0,0);                         /*senkt das Bein L1*/
```

```
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(L,1,lift);                      /*hebt das Bein L2*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        swingleg(L,1,-stroke);                  /*schwingt das Bein L2*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(L,1,0);                         /*senkt das Bein L2*/
        liftleg(L,2,lift);                      /*hebt das Bein L3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        swingleg(L,2,-stroke);                  /*schwingt das Bein L3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(L,2,0);                         /*senkt das Bein L3*/
        liftleg(R,0,lift);                      /*hebt das Bein R1*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        swingleg(R,0,-stroke);                  /*schwingt das Bein R1*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(R,0,0);                         /*senkt das Bein R1*/
        liftleg(R,1,lift);                      /*hebt das Bein R2*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        swingleg(R,1,-stroke);                  /*schwingt das Bein R2*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(R,1,0);                         /*senkt das Bein R2*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(R,2,lift);                      /*hebt das Bein R3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        swingleg(R,2,-stroke);                  /*schwingt das Bein R3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(R,2,0);                         /*senkt das Bein R3*/
        OSWait(waittime);                       /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*************************************************************************/
/* bewegt den Rumpf nach vorn, alle Beine befinden sich zu diesem Zeitpunkt in der Stützphase*/
void ftlkoerperbewegen()
{
        swingleg(L,0,stroke);
        swingleg(R,0,stroke);
        swingleg(L,1,stroke);
        swingleg(R,1,stroke);
        swingleg(L,2,stroke);
        swingleg(R,2,stroke);
        OSWait(waittime);                       /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*************************************************************************/
```

```
/*Dieses ist die Funktion die im Menü bei der Wahl des Follow-the-Leader Gait aufgerufen wird. Ruft die Funktionen auf, die für diese Gangart notwendig sind */
void ftlgait()
{
int i=0;
  for (i=0; i<50; i++)
        {
        ftlbeinsetzen();                    /*ruft die Funktion ftlbeinsetzen auf*/
        ftlkoerperbewegen();                /*ruft die Funktion ftlkoerperbewegen auf*/
        }
}

/*********************************************************************/
/************************ Equal Phase Gait ********************/
/*********************************************************************/
/*In dieser Funktion werden die Beine in die für den Equal-Phase Gait notwendige Ausgangsstellung gebracht.*/
void equalstart()
{
        liftleg(L,0,lift);                  /*hebe Bein L1*/
        OSWait(MINWAIT);                    /*Eine erzwungene Pause*/
        swingleg(L, 0, FEET_POS6[5]);       /*schwenke Bein L1 an die Position des 6.Wertes in
                                            der Liste*/
        OSWait(MINWAIT);                    /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(L,0,0);                     /*senke Bein L1*/
        OSWait(MINWAIT);                    /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(L,1,lift);                  /*hebe Bein L2*/
        OSWait(MINWAIT);                    /*Eine erzwungene Pause*/
        swingleg(L, 1, FEET_POS6[4]);       /*schwenke Bein L2 an die Position des 5.Wertes in
                                            der Liste*/
        OSWait(MINWAIT);                    /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(L,1,0);                     /*senke Bein L2*/
        OSWait(MINWAIT);                    /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(L,2,lift);                  /*hebe Bein L3*/
        OSWait(MINWAIT);                    /*Eine erzwungene Pause*/
        swingleg(L, 2, FEET_POS6[3]);       /*schwenke Bein L3 an die Position des 4.Wertes in
                                            der Liste */
        OSWait(MINWAIT);                    /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(L,2,0);                     /*senke Bein L3*/
        OSWait(MINWAIT);                    /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(R,0,lift);                  /*hebe Bein R1*/
        OSWait(MINWAIT);                    /*Eine erzwungene Pause*/
        swingleg(R, 0, FEET_POS6[2]);       /*schwenke Bein R1 an die Position des 3.Wertes
                                            in der Liste */
        OSWait(MINWAIT);                    /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(R,0,0);                     /*senke Bein R1*/
```

```
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(R,1,lift);                      /*hebe Bein R2*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        swingleg(R, 1, FEET_POS6[1]);           /*schwenke Bein R2 an die Position des 2.Wertes
                                                in der Liste */
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(R,1,0);                         /*senke Bein R2*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(R,2,lift);                      /*hebe Bein R3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        swingleg(R, 2, FEET_POS6[0]);           /*schwenke Bein R3 an die Position des 1.Wertes
                                                in der Liste*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(R,2,0);                         /*senke Bein R2*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/

        af.site = R;                            /*weist der Struktur den Wert R zu*/
        af.number = 2;                          /*weist der Struktur den Wert 2 zu*/
}

/*****************************************************************/
void activleg()
{
        /* hebe bein und setze es nach vorne*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        liftleg(af.site, af.number, lift);      /*hebt das aktive Bein*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        swingleg(af.site, af.number, FEET_POS6[5]);     /*schwenke das aktive Bein an die Position des
6.Wertes in der Liste*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*****************************************************************/
void equalbewegung ()
{
        activleg();                             /*ruft die Funktion activleg auf*/
        /* Bewegung der anderen Beine */
        swingleg(L, 0, FEET_POS6[4]);           /*schwenke das Bein L1 an die Position des
                                                5.Wertes in der Liste*/
        swingleg(L, 1, FEET_POS6[3]);           /*schwenke das Bein L2 an die Position des
                                                4.Wertes in der Liste*/
        swingleg(L, 2, FEET_POS6[2]);           /*schwenke das Bein L3 an die Position des
                                                3.Wertes in der Liste*/
        swingleg(R, 0, FEET_POS6[1]);           /*schwenke das Bein R1 an die Position des
                                                2.Wertes in der Liste*/
```

```
swingleg(R, 1, FEET_POS6[0]);          /*schwenke das Bein R2 an die Position des
                                        1.Wertes in der Liste*/
OSWait(MINWAIT);                       /*Eine erzwungene Pause*/

/* aktive Bein wird wieder gesenkt */
liftleg(af.site, af.number, 0);        /*senke das aktive Bein*/
/* ändern des aktiven beines */
af.site = R;                           /*weist der Struktur den Wert R zu*/
af.number = 1;                         /*weist der Struktur den Wert 1 zu*/
OSWait(MINWAIT);                       /*Eine erzwungene Pause*/

activleg();                            /*ruft die Funktion activleg auf*/
/*Bewegung der anderen Beine */
swingleg(L, 0, FEET_POS6[3]);          /*schwenke das Bein L1 an die Position des
                                        4.Wertes in der Liste*/
swingleg(L, 1, FEET_POS6[2]);          /*schwenke das Bein L2 an die Position des
                                        3.Wertes in der Liste*/
swingleg(L, 2, FEET_POS6[1]);          /*schwenke das Bein L3 an die Position des
                                        2.Wertes in der Liste*/
swingleg(R, 0, FEET_POS6[0]);          /*schwenke das Bein R1 an die Position des
                                        1.Wertes in der Liste*/
swingleg(R, 2, FEET_POS6[4]);          /*schwenke das Bein R3 an die Position des
                                        5.Wertes in der Liste*/
OSWait(MINWAIT);                       /*Eine erzwungene Pause*/

/* aktive Bein wird wieder gesenkt */
liftleg(af.site, af.number, 0);        /*senke das aktive Bein*/
/* ändern des aktiven beines */
af.site = R;                           /*weist der Struktur den Wert R zu*/
af.number = 0;                         /*weist der Struktur den Wert 0 zu*/
OSWait(MINWAIT);                       /*Eine erzwungene Pause*/

activleg();                            /*ruft die Funktion activleg auf*/
/*Bewegung der anderen Beine */
swingleg(L, 0, FEET_POS6[2]);          /*schwenke das Bein L1 an die Position des
                                        3.Wertes in der Liste*/
swingleg(L, 1, FEET_POS6[1]);          /*schwenke das Bein L2 an die Position des
                                        2.Wertes in der Liste*/
swingleg(L, 2, FEET_POS6[0]);          /*schwenke das Bein L3 an die Position des
                                        1.Wertes in der Liste*/
swingleg(R, 1, FEET_POS6[4]);          /*schwenke das Bein R2 an die Position des
                                        5.Wertes in der Liste*/
swingleg(R, 2, FEET_POS6[3]);          /*schwenke das Bein R3 an die Position des
                                        4.Wertes in der Liste*/
OSWait(MINWAIT);                       /*Eine erzwungene Pause*/
```

```
/* aktive Bein wird wieder gesenkt */
liftleg(af.site, af.number, 0);                 /*senke das aktive Bein*/
/* ändern des aktiven beines */
af.site = L;                                    /*weist der Struktur den Wert L zu*/
af.number = 2;                                  /*weist der Struktur den Wert 2 zu*/
OSWait(MINWAIT);                                /*Eine erzwungene Pause*/

activleg();                                     /*ruft die Funktion activleg auf*/
/*Bewegung der anderen Beine */
swingleg(L, 0, FEET_POS6[1]);                   /*schwenke das Bein L1 an die Position des
                                                2.Wertes in der Liste*/
swingleg(L, 1, FEET_POS6[0]);                   /*schwenke das Bein L2 an die Position des
                                                1.Wertes in der Liste*/
swingleg(R, 0, FEET_POS6[4]);                   /*schwenke das Bein R1 an die Position des
                                                5.Wertes in der Liste*/
swingleg(R, 1, FEET_POS6[3]);                   /*schwenke das Bein R2 an die Position des
                                                4.Wertes in der Liste*/
swingleg(R, 2, FEET_POS6[2]);                   /*schwenke das Bein R3 an die Position des
                                                3.Wertes in der Liste*/
OSWait(MINWAIT);                                /*Eine erzwungene Pause*/

/* aktive Bein wird wieder gesenkt */
liftleg(af.site, af.number, 0);                 /*senke das aktive Bein*/
/* ändern des aktiven beines */
af.site = L;                                    /*weist der Struktur den Wert L zu*/
af.number = 1;                                  /*weist der Struktur den Wert 1 zu*/
OSWait(MINWAIT);                                /*Eine erzwungene Pause*/

activleg();                                     /*ruft die Funktion activleg auf*/
/*Bewegung der anderen Beine */
swingleg(L, 0, FEET_POS6[0]);                   /*schwenke das Bein L1 an die Position des
                                                1.Wertes in der Liste*/
swingleg(L, 2, FEET_POS6[4]);                   /*schwenke das Bein L3 an die Position des
                                                5.Wertes in der Liste*/
swingleg(R, 0, FEET_POS6[3]);                   /*schwenke das Bein R1 an die Position des
                                                4.Wertes in der Liste*/
swingleg(R, 1, FEET_POS6[2]);                   /*schwenke das Bein R2 an die Position des
                                                3.Wertes in der Liste*/
swingleg(R, 2, FEET_POS6[1]);                   /*schwenke das Bein R3 an die Position des
                                                2.Wertes in der Liste*/
OSWait(MINWAIT);                                /*Eine erzwungene Pause*/

/* aktive Bein wird wieder gesenkt */
liftleg(af.site, af.number, 0);                 /*senke das aktive Bein*/
```

```
        /* ändern des aktiven beines */
        af.site = L;                            /*weist der Struktur den Wert L zu*/
        af.number = 0;                          /*weist der Struktur den Wert 0 zu*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/

        activleg();                             /*ruft die Funktion activleg auf*/
        /*Bewegung der anderen Beine */
        swingleg(L, 1, FEET_POS6[4]);           /*schwenke das Bein L2 an die Position des
                                                5.Wertes in der Liste*/
        swingleg(L, 2, FEET_POS6[3]);           /*schwenke das Bein L3 an die Position des
                                                4.Wertes in der Liste*/
        swingleg(R, 0, FEET_POS6[2]);           /*schwenke das Bein R1 an die Position des
                                                3.Wertes in der Liste*/
        swingleg(R, 1, FEET_POS6[1]);           /*schwenke das Bein R2 an die Position des
                                                2.Wertes in der Liste*/
        swingleg(R, 2, FEET_POS6[0]);           /*schwenke das Bein R3 an die Position des
                                                1.Wertes in der Liste*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/

        /* aktive Bein wird wieder gesenkt */
        liftleg(af.site, af.number, 0);         /*senke das aktive Bein*/
        /* ändern des aktiven beines */
        af.site = R;                            /*weist der Struktur den Wert R zu*/
        af.number = 2;                          /*weist der Struktur den Wert R zu*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*****************************************************************/
/*Dieses ist die Funktion die im Menü bei der Wahl des Equal-Phase Gait aufgerufen wird. Ruft die Funktionen
auf, die für diese Gangart notwendig sind */
void epgait()
{
        int i = 1;
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
        for (i=1; i<100;i++)
        equalbewegung();                        /*ruft die Funktion equalbewegung auf*/
}

/*****************************************************************/
/****************turn *** Drehen auf der Stelle ****************/
/*****************************************************************/
void schwenkent1()
{
        swingleg(L,0,-stroke2);                 /*schwinge das Bein L1*/
        swingleg(R,1,stroke2);                  /*schwinge das Bein R2*/
```

```
        swingleg(L,2,-stroke2);                 /*schwinge das Bein L3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*****************************************************************/
void schwenkent2()
{
        swingleg(R,0,stroke2);                  /*schwinge das Bein R1*/
        swingleg(L,1,-stroke2);                 /*schwinge das Bein L2*/
        swingleg(R,2,stroke2);                  /*schwinge das Bein R3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*****************************************************************/
void drehungt()
{
        swingleg(L,0,stroke2);                  /*schwinge das Bein R1*/
        swingleg(R,1,-stroke2);                 /*schwinge das Bein R2*/
        swingleg(L,2,stroke2);                  /*schwinge das Bein L3*/
        swingleg(R,0,-stroke2);                 /*schwinge das Bein R1*/
        swingleg(L,1,stroke2);                  /*schwinge das Bein L2*/
        swingleg(R,2,-stroke2);                 /*schwinge das Bein R3*/
        OSWait(MYWAIT);                         /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*****************************************************************/
void turn()
{
  int i;
  for (i=0; i<110; i++)
        {
        heben1();
        schwenkent1();
        senken1();
        heben2();
        schwenkent2();
        senken2();
        drehungt();
        }
}

/*****************************************************************/
/*************** SwingL *** Läuft eine Linksskurve ***************/
/*****************************************************************/
void schwenkswingl1()
```

```
/*    schwenkt beine nach vorne*/
{
                swingleg(L,0,-stroke2);                    /*schwinge das Bein L1*/
                swingleg(R,1,-stroke1);                    /*schwinge das Bein R2*/
                swingleg(L,2,-stroke2);                    /*schwinge das Bein L3*/
                OSWait(MINWAIT);                           /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*****************************************************************/
void schwenkswingl2()
/*    schwenkt die anderen beine nach vorne*/
{
                swingleg(R,0,-stroke1);                    /*schwinge das Bein R1*/
                swingleg(L,1,-stroke2);                    /*schwinge das Bein L2*/
                swingleg(R,2,-stroke1);                    /*schwinge das Bein R3*/
                OSWait(MINWAIT);                           /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*****************************************************************/
void vorwaertsswingl1()
/*    bewegt den körper*/
{
          swingleg(L,0,0);                                 /*schwinge das Bein L1*/
          swingleg(R,1,0);                                 /*schwinge das Bein R2*/
          swingleg(L,2,0);                                 /*schwinge das Bein L3*/
          swingleg(R,0,+stroke1);                          /*schwinge das Bein R1*/
          swingleg(L,1,+stroke2);                          /*schwinge das Bein L2*/
          swingleg(R,2,+stroke1);                          /*schwinge das Bein R3*/
          OSWait(MINWAIT);                                 /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*****************************************************************/
void vorwaertsswingl2()
/*    bewegt den Körper wieder nach vorne*/
{
          swingleg(R,0,0);                                 /*schwinge das Bein R1*/
          swingleg(L,1,0);                                 /*schwinge das Bein L2*/
          swingleg(R,2,0);                                 /*schwinge das Bein R3*/
          swingleg(L,0,+stroke2);                          /*schwinge das Bein L1*/
          swingleg(R,1,+stroke1);                          /*schwinge das Bein R2*/
          swingleg(L,2,+stroke2);                          /*schwinge das Bein L3*/
          OSWait(MINWAIT);                                 /*Eine erzwungene Pause*/
}
```

```
/*****************************************************************/
void swingL()
{
  int i;
  for (i=0; i<83; i++)
  {
        heben1();
        schwenkswingl1();
        senken1();
        vorwaertsswingl1();
        heben2();
        schwenkswingl2();
        senken2();
        vorwaertsswingl2();
  }
}

/*****************************************************************/
/************ SwingR *** Läuft eine Rechtskurve *************/
/*****************************************************************/
void schwenkswingr1()
/*   schwenkt beine nach vorne*/
{
        swingleg(L,0,-stroke1);                 /*schwinge das Bein L1*/
        swingleg(R,1,-stroke2);                 /*schwinge das Bein R2*/
        swingleg(L,2,-stroke1);                 /*schwinge das Bein L3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*****************************************************************/
void schwenkswingr2()
/*   schwenkt die anderen beine nach vorne*/
{
        swingleg(R,0,-stroke2);                 /*schwinge das Bein R1*/
        swingleg(L,1,-stroke1);                 /*schwinge das Bein L2*/
        swingleg(R,2,-stroke2);                 /*schwinge das Bein R3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*****************************************************************/
/*wird in void swingR aufgerufen um den Rumpf des Roboters nach vorn zu bewegen.*/
void vorwaertsswingr1()
{
        swingleg(L,0,0);                        /*schwinge das Bein L1*/
        swingleg(R,1,0);                        /*schwinge das Bein R2*/
```

```
        swingleg(L,2,0);                        /*schwinge das Bein L3*/
        swingleg(R,0,stroke2);                  /*schwinge das Bein R1*/
        swingleg(L,1,stroke1);                  /*schwinge das Bein L2*/
        swingleg(R,2,stroke2);                  /*schwinge das Bein R3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*****************************************************************/
/*wird in void swingR aufgerufen um den Rumpf des Roboters nach vorn zu bewegen.*/
void vorwaertsswingr2()
{
        swingleg(R,0,0);                        /*schwinge das Bein R1*/
        swingleg(L,1,0);                        /*schwinge das Bein L2*/
        swingleg(R,2,0);                        /*schwinge das Bein R3*/
        swingleg(L,0,stroke1);                  /*schwinge das Bein L1*/
        swingleg(R,1,stroke2);                  /*schwinge das Bein R2*/
        swingleg(L,2,stroke1);                  /*schwinge das Bein L3*/
        OSWait(MINWAIT);                        /*Eine erzwungene Pause*/
}

/*****************************************************************/
/*Dieses ist die Funktion die im Menü bei der Wahl des Swing Right aufgerufen wird. Ruft die Funktionen auf, die
für diese Gangart notwendig sind */
void swingR()
{
  int i;
  for (i=0; i<50; i++)                          /*Schleifendurchläufe*/
  {
        heben1();                               /*ruft die Funktion heben1 auf*/
        schwenkswingr1();                       /*ruft die Funktion heben1 auf*/
        senken1();                              /*ruft die Funktion senken1 auf*/
        vorwaertsswingr1();                     /*ruft die Funktion vorwaertsswingr1 auf*/
        heben2();                               /*ruft die Funktion heben2 auf*/
        schwenkswingr2();                       /*ruft die Funktion schwenkswingr2 auf*/
        senken2();                              /*ruft die Funktion schwenkswingr2 auf*/
        vorwaertsswingr2();                     /*ruft die Funktion vorwaertsswingr2 auf*/
  }
}

/*****************************************************************/
/* Dieses Menü erscheint, wenn man sich für die krummlinigen Bewegungen entschieden hat. Hier kann man
zwischen dem Swing Left, Swing Right und Turn wählen.*/
int SwingMenu()
{
int wahl=0, step=0;
```

```
        while (wahl != KEY4)
        {
                LCDClear();
                LCDSetString(0,0,"Bewegungswahl:");
                LCDSetString(2,0,"1: Turn");
                LCDSetString(3,0,"2: Swing left");
                LCDSetString(4,0,"3: Swing right");
                LCDMenu("1", "2", "3","END");

        wahl = KEYGet();
                step = 0;
                while (step != KEY4)
                        {
                                LCDClear();
                                switch (wahl)
                        {
                                case KEY1: turn(); break;
                                case KEY2: swingL(); break;
                                case KEY3: swingR(); break;
                        }break;
                        }break;/* Ende while (step != KEY4) */
        }/* Ende while (step != KEY4) */
}

/*********************************************************************/
/*Dieses Menü erscheint, wenn man sich für die geradlinigen Bewegungen entschieden hat. Hier kann man zwischen den geradlinigen Gangarten wählen.*/
void GaitMenu()
{
int wahl=0;
int mode =0, goes = 0, tests = 0, gaits = 0;
  while (mode != KEY4)
  {
    LCDClear();
    LCDSetString(0,0,"Wahl der Gaits:");

    LCDSetString(2,0,"1: Wavegait");
    LCDSetString(3,0,"2: FTL");
    LCDSetString(4,0,"3: EPG");
    LCDMenu(" 1 "," 2 ", " 3 ","END");

    mode = KEYGet();

        switch(mode)
        {
```

```
        case KEY1: tripod(); break;

        case KEY2: ftlgait(); break;

        case KEY3: equalstart();
                while (goes != KEY4)
                        {
                                /* Untermenu: */
                                LCDClear();
                LCDSetString(0,0,"EqualPhaseGait:");
                LCDSetString(2,0,"1: Start");
                LCDMenu(" 1 ","  ", "  ","END");
                goes = KEYGet();
                switch(goes)
                {
                        case KEY1: epgait(); break;
                }

                /* Ende while (gaits != KEY4) */
                  break;
        }/* Ende switch (mode) */
  } /* Ende while (mode != KEY4) */
}}

/*********************************************************************/
/* Dieses Menü erscheint auf dem Display. Hier wird dann eine Auswahl zwischen den geradlinigen und krummli-
nigen Bewegungen getroffen*/
void MainMenu(void)
{
  int mode =0;
  while (mode != KEY4)
  {
    LCDClear();
    LCDSetString(0,0,"Bitte Waehlen:");

    LCDSetString(2,0,"1: Gaits");
    LCDSetString(3,0,"2: Kurven");
    LCDMenu(" 1 "," 2 ", " 3 ","END");

    mode = KEYGet();

        switch(mode)
        {
        case KEY1:    GaitMenu(); break;
        case KEY2:    SwingMenu();break;
```

```
            default : break;
            }
  }
}
/*************************************************************************/
void main(void)
{
            initServos();                       /*Initialisierung der Servomotoren*/
            initialize();                       /Servomotoren in Nullstellung bringen*/
            MainMenu();                         /Aufruf des 1. Auswahlmenüs*/
            OSWait(100);                        /*Erzwungene Pause*/
            reset();                            /*Positionierung der Servos in Nullstellung*/
            OSWait(100);                        /*Erzwungene Pause*/
            release();                          /*Freigabe der Servomotoren*/
}
```