

2 Aufbau, Aktorik und Sensorik

2.1 Mechanischer Aufbau

Bei dem Bau einer Gehmaschine muß unter Berücksichtigung des vorgesehenen Einsatzes zuerst die grundlegende Entscheidung getroffen werden, ob Struktur und Kinematik des Roboters sich an natürlichen Vorbildern orientieren soll oder ob eine „freie“ Konstruktion erfolgen soll. Das schließt auch die Zahl der Beine und Gelenke mit ein.

Für den Bau sechsbeiniger Maschinen bieten sich als Vorbilder Insekten (Hexapoden) an. Der Vorteil einer solchen Vorlage ist, daß die entsprechende Insektenart durch ihr bloßes Vorhandensein auch nach einer jahrmillionen dauernder Evolution eine hinreichende Anpassung an ihre Lebensverhältnisse bewiesen hat. Dabei ist natürlich problematisch, daß die genauen „Optimierungskriterien“, die aufgrund des Selektionsdrucks auf die entsprechende Art gewirkt haben, unbekannt sind. Es bleibt aber die Vermutung, daß auch der Bewegungsapparat dieser Art sich stetig verbessert hat, um den Anforderung der Umwelt immer besser zu genügen. Verschiedene Forschungsergebnisse, beispielsweise von G. PRATT [PWD⁺95], J. PRATT [Pra00], WITTE ET AL. [WHI⁺00][HWF00], deuten daraufhin, daß der „richtige“ Körperbau, die Art und Lage von Muskeln, Sehnen und Gelenken den notwendigen Kontrollaufwand, insbesondere für dynamisch laufende Mechanismen, extrem verringern kann.

Allerdings ergeben sich aus der Wahl natürlicher Vorbilder auch Nachteile. Die Offensichtlichsten, aber auch am Leichtesten zu bewältigenden, sind die schwierig zu fertigenden Längen und Winkel der entsprechenden Elemente und die jeweils paarweise unterschiedlichen Extremitäten (siehe auch Tabelle 1, Seite 20). Hier muß aber berücksichtigt werden, daß das durchgängige Auftreten von unterschiedlich langen Beinen mit unterschiedlichen Gelenkkonfigurationen darauf hindeutet, daß dieses Prinzip in praktisch allen Fällen sinnvoll ist.

Eine Gefahr besteht allerdings darin, im Nachbau lediglich Biomimikry zu betreiben. Dies ist der Fall, wenn bestimmte Eigenschaften des Vorbildes übernommen

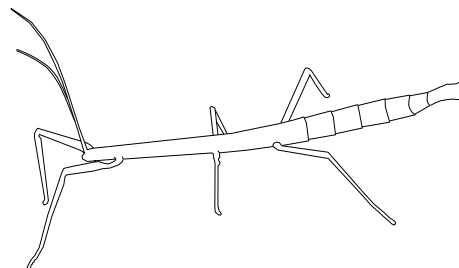


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Stabheuschrecke

werden, ohne deren eigentlichen Sinn tatsächlich zu verstehen und nachzubilden. Da aufgrund fehlender technischer Möglichkeiten die komplette Kopie aller Eigenschaften nicht möglich ist, ergibt sich leicht die Situation, daß Elemente der Vorlage, die erst in ihrer Kombination korrekt wirken, nur teilweise übernommen werden. Es ist also wichtig, das kopierte Modell immer wieder kritisch zu beurteilen und zu optimieren. Im Gegenzug kann dieser Prozeß aber auch helfen, Funktionsweisen des Originals am Nachbau zu erforschen und ein nicht offensichtliches Zusammenspiel von Eigenschaften aufzuzeigen.

Gehmaschinen die sich nicht an natürlichen Vorbildern orientieren, sind zwar technisch oft einfacher zu konstruieren, neigen aber auch zu unharmonischen und eckigen Bewegungsabläufen. Dem Bewegungsapparat mangelt es leicht an den entsprechenden Voraussetzungen für eine runde Bewegung.

Die TARRY¹ Gehmaschinen sind in ihrem Aufbau von der Stabheuschrecke *Carausius morosus* inspiriert (siehe Abbildung 5). Bei diesem Insekt handelt es sich um eine Art aus der Ordnung der *Phasmatodea*. Zu dieser Ordnung mit über 2500 Arten zählt mit dem 300 mm langen *Palophus titan* auch eines der größten Insekten überhaupt [Rem91]. *Carausius morosus* ist dabei mit einer Länge von ungefähr 72 mm ein kleiner Vertreter dieser Ordnung [Bäs88].

Verschiedene Eigenschaften prädestinieren dieses Insekt für weitgehende Untersuchungen. Der gesamte Bewegungsapparat dieser Stabheuschrecke ist gut sichtbar. Die Beine sind seitlich am Körper angebracht und sind nicht von einem Panzer oder ähnlichem verdeckt. Dabei haben die Beine einen verhältnismäßig großen Abstand voneinander, wie auch das Insekt selbst relativ groß ist. Dies, verbunden mit den langsamen Bewegungen, die das Tier ausführt, erleichtern die optische Beobachtung des Tieres. Die verhältnismäßig einfache Präparierbarkeit der Neuronen erweitert diese Möglichkeiten zusätzlich und steigert die Attraktivität dieses Insektes für Beobachtungen umso mehr. Die hohe Anzahl bereits bekannter Daten macht *Carausius morosus* auch als Vorbild für eine Gehmaschine attraktiv.

Der geometrische Aufbau aller TARRY Gehmaschinen entspricht grob den Vorgaben, die sich aus der skalierten Geometrie der Stabheuschrecke ergeben. Dabei wurden mit der Weiterentwicklung der Maschine und dem zunehmenden Verständnis bestimmter Eigenschaften Anpassungen vorgenommen, die eine bessere Funktion der Maschine ermöglichen, sich aber vom Vorbild wegbewegen.

2.1.1 Prinzipieller Aufbau

Angelehnt an sein Vorbild (vgl. Abb. 6) bestehen auch die Beine von TARRY aus drei Gliedern, *Coxa*, *Femur* und *Tibia*. Diese Glieder sind jeweils durch ein Drehgelenk miteinander verbunden.

¹Der Begriff TARRY wird seit dem Bau der zweiten Maschine nicht mehr auf das erste, nun als TARRY I bezeichnete Exemplar bezogen. Stattdessen wird es als Oberbegriff für alle TARRY Gehmaschinen verwendet.

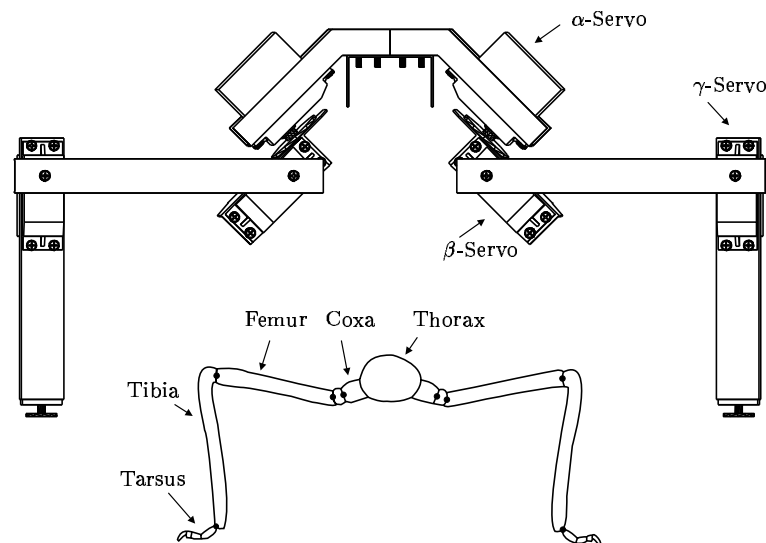


Abbildung 6: Vorderes Segment der Gehmaschine TARRY II im Vergleich zur Stabheuschrecke

Die Drehachsen des *Coxa-Femur* und des *Femur-Tibia*-Gelenkes liegen parallel und stehen senkrecht auf der durch *Femur* und *Tibia* aufgespannten Ebene. Die Drehachse des *Coxa-Thorax*-Gelenkes ist zeitinvariant gegen ein im Ansatzpunkt der Hüfte eingeführtes Koordinatensystem verdreht. Diese Rotation wird in Abschnitt 2.1.2 näher beschrieben. Die drei Beinsegmente werden in der Tabelle 1 (Seite 20) als l_1 , l_2 und l_3 bezeichnet. Die Gelenke werden, wie in Abbildung 6 sichtbar, als α -, β und γ Gelenk bezeichnet. Die Bezeichnung und Indizierung der Beine kann Abbildung 7 entnommen werden.

Die Modellierung des *Coxa-Thorax*-Gelenkes als einfaches Drehgelenk stellt eine wesentliche Einschränkung dar. Bei dem natürlichen Vorbild handelt es sich hier um ein Gelenk mit mehreren Freiheitsgraden. Die Vereinfachung wurde unter anderem im Hinblick auf die Tatsache, daß sich bei einem Geradeauslauf in horizontalem, ebenem Gelände die Gelenkbewegung im wesentlichen auf eine Drehung um eine Achse beschränkt, vorgenommen [Cru76][PWD91].

Die Maschinen sollen natürlich in der Lage sein, sich in unebenem Gelände fortzubewegen und Gangarten wie den Seitwärtsgang oder das Drehen auf der Stelle zu beherrschen. Diese Bewegungsabläufe können an dem Vorbild nicht beobachtet werden, daher müssen sie im Experiment auf ihre Nutzbarkeit überprüft werden. Da aber Vorwärts- und Kurvenlauf die Hauptgangarten der Maschinen sind, können kleinere Einschränkungen an anderer Stelle toleriert werden, solange diese zusätzlichen Gangarten hinreichend gut ausgeführt werden können.

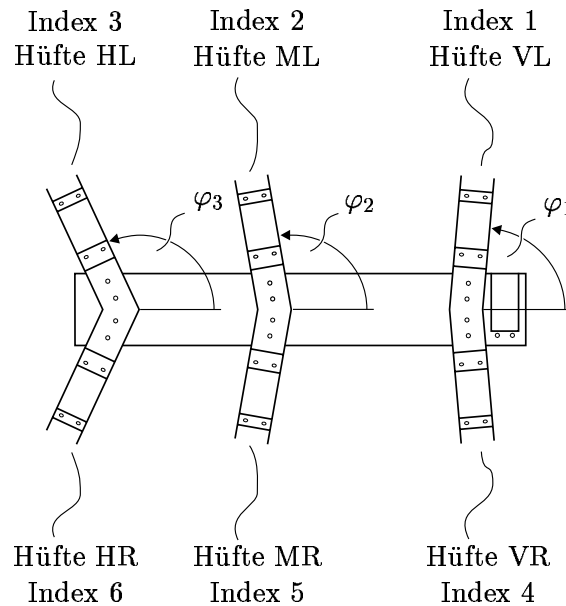


Abbildung 7: Zentralkörper mit den Bein- und Hüftbezeichnungen sowie deren Numerierung

2.1.2 Koordinatensysteme

Ebenso wie die grundlegenden geometrischen Verhältnisse sind Lage und Orientierung der verwendeten Koordinatensysteme der Gehmaschinen ähnlich.

Jede der Maschinen besitzt ein körperfestes Koordinatensystem, das als Ausgangspunkt für weitere Berechnungen dient. Die Lage dieses Systems ist in Abbildung 8 dargestellt. Das Rechtssystem befindet sich in der Mitte der Verbindungslinie der Drehpunkten der α -Gelenke des mittleren Beinpaars. Die ${}^r z$ -Achse zeigt nach oben und die ${}^r x$ -Achse in die Vorwärtsrichtung.

Dieses System dient als Ausgangspunkt für die meisten Berechnungen. An einigen Stellen kann es vereinfachend sein, ein raumfestes System ${}^i \mathcal{K}$ als Hilfssystem zu verwenden. Zusätzlich sind für jedes der Beine weitere Koordinatensysteme eingeführt:

- Ein zentralkörperfestes Koordinatensystem im Drehpunkt des Hüftgelenkes des jeweiligen Beines. Dieses System hat die gleiche Orientierung wie das Referenzsystem (Index k).
- Das *Coxa*-System (Index c). Dieses Gelenk hat den gleichen Ursprung wie das k -System, ist aber um die Winkel φ in ein Hilfssystem (Index a) und darauf um ψ in seine endgültige Lage verdreht. Dadurch bildet die ${}^c z$ -Achse die erste Gelenkachse des Beines. Dies ist die Achse, um die sich das *Coxa*-Segment

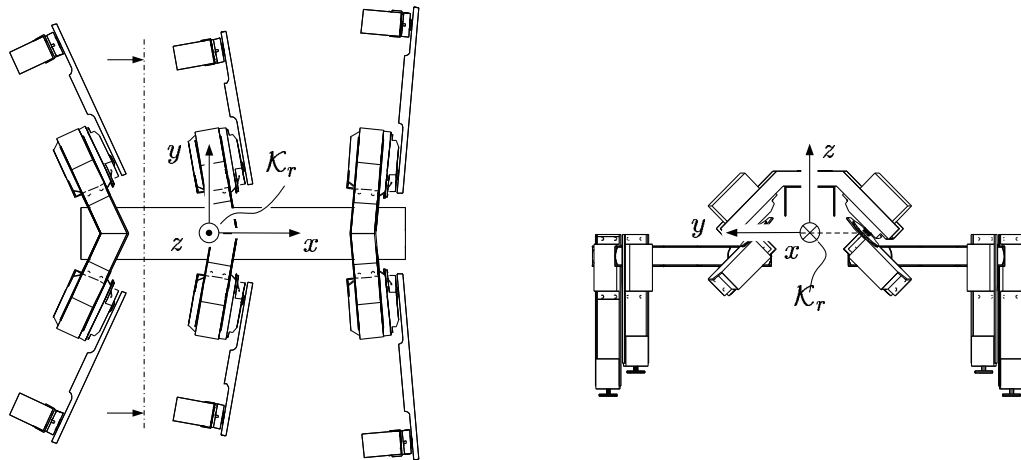


Abbildung 8: Lage des körperfesten Referenzsystems

dreht. In der Mittelstellung des Beines fallen dessen Längsachse und die ${}^c x$ -Achse zusammen.

- Für die beiden weiteren Beinsegmente *Femur* und *Tibia* je ein segmentfestes Koordinatensystem, dessen x -Achse in Richtung der Segmentlängsachse weist. Dabei bildet die z -Achse jeweils die Drehachse des zugehörigen Gelenkes.

Der überwiegende Teil der zur Berechnung verwendeten Koordinatensysteme hat die gleiche Orientierung wie das Referenzsystem. Hier reicht also ein Verschiebungsvektor zur Beschreibung der Transformation aus. Die Komponenten können mit Hilfe der oben angegebenen Geometriedaten leicht bestimmt werden. Lediglich die Transformation vom k - in das c -System erfordert eine Rotationsmatrix. Für sie gilt:

$${}^c \mathbf{R}_k = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \psi & -\sin \varphi & \cos \varphi \sin \psi \\ \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi & \sin \varphi \sin \psi \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{pmatrix}$$

Die beinbezogenen Koordinatensysteme werden für die in Abschnitt 4.1 beschriebene analytische Erzeugung der Gangmuster genutzt. Intern finden diese Systeme auch in der Repräsentation und Berechnung des Körpermodells in Abschnitt 5.3.2 Verwendung.

2.2 Die ausgeführten Gehmaschinen

2.2.1 Tarry I

Die Gehmaschine TARRY I ist im Rahmen der Arbeit von AMENDT [Ame95] entwickelt und vorgestellt worden. Die Geometrie der Maschine, die der Tabelle 1 zu

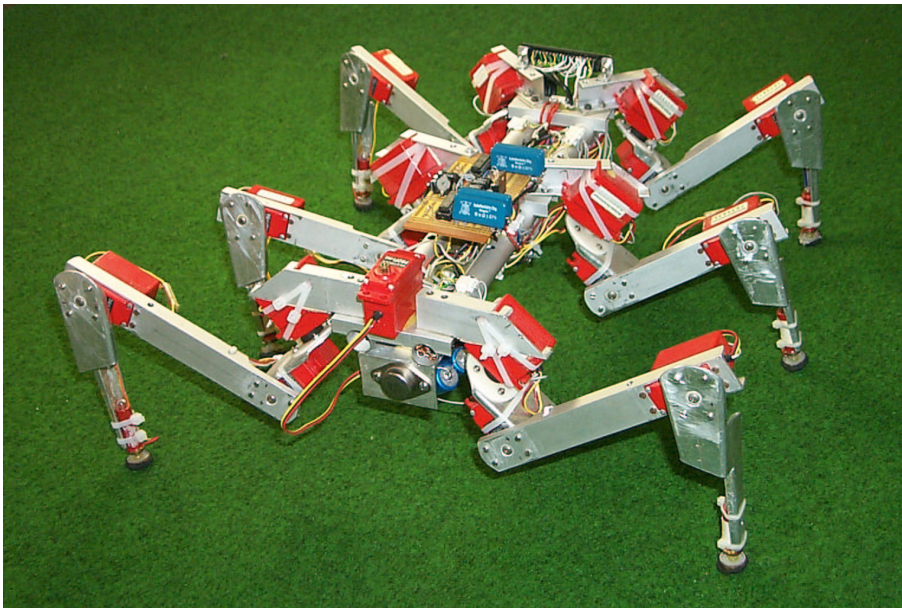


Abbildung 9: Die Gehmaschine TARRY I

entnehmen ist, lehnt sich sehr stark an die Geometrie der Stabheuschrecke an, wie sie von CRUSE in [Cru76] beschrieben wurde. Aus konstruktiven Gründen ist allerdings das *Coxa*-Element vergleichsweise groß ausgefallen. Um die Belastung der ohnehin an ihren Grenzen arbeitenden β -Servomotoren zu vermindern, sind die Beinsegmente verkürzt worden.

Die Struktur der Maschine ergibt sich aus den verwendeten Aluminiumrohren und den umgeformten Aluminiumblechen. Diese zeichnen sich bei geringem Gewicht durch eine verhältnismäßig hohe Biege- und Torsionssteifigkeit aus. Die Maschine hat dadurch eine Gesamtmasse von nur 2100 g.

Der Zentralkörper besteht aus zwei parallelen Aluminiumrohren. Sie werden verbunden durch drei Profile in den Hüftbereichen. Diese dienen auch der Befestigung der Hüftgelenke aller sechs Beine (siehe Abbildung 9). Die Längsabstände zwischen den Hüften und die Hüftbreiten selbst ergeben sich aus der Lage der Koordinatensysteme, wie sie in Tabelle 2 angegeben sind.

Die einzelnen Elemente werden je nach Anforderungen und Möglichkeiten zum Teil durch Verschraubung, aber auch durch Klebverfahren verbunden. Dies führt insbesondere bei stark beanspruchten Verbindungen leicht zu Verschiebungen. Zusätzlich ist es schwierig, veränderte oder reparierte Teile korrekt zu repositionieren.

Als Gelenk und Antrieb zugleich dienen Servomotoren der Firma Multiplex. Hier sind die Modelle der Serie „profi“ verwendet worden. Deren Daten können Tabelle 3 entnommen werden.

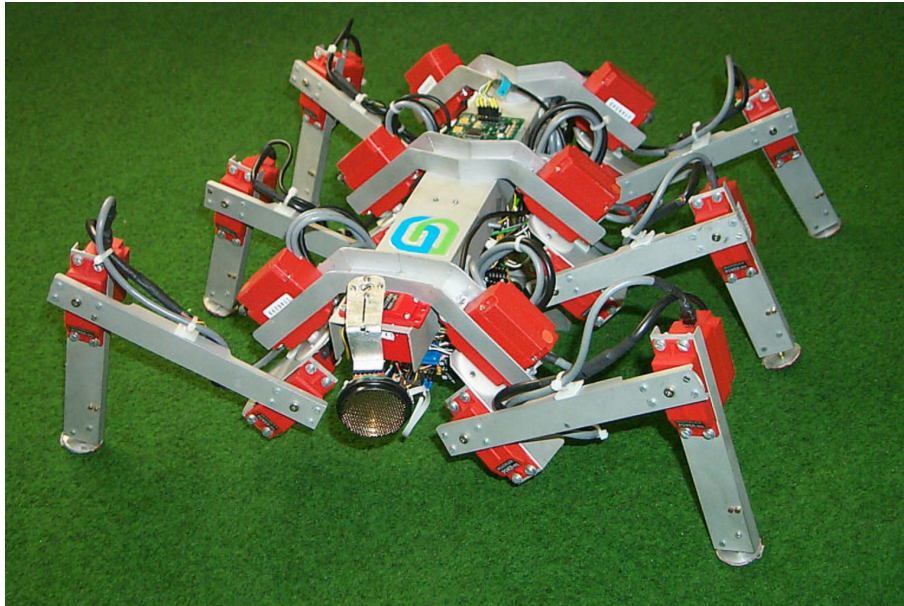


Abbildung 10: Die Gehmaschine TARRY II

2.2.2 Tarry II

In der Gehmaschine TARRY II konnten die Erfahrungen, Erkenntnisse und das fortschreitende Verständnis für den gesamten Mechanismus, die sich aus dem Betrieb von TARRY I ergeben hatten, genutzt werden, um Schwachstellen auszuschalten und die Abläufe zu optimieren.

Die Neukonstruktion ist insbesondere unter Berücksichtigung folgender Ziele erfolgt:

- Vergrößerung der Tragfähigkeit/Gesamtleistung
Die Maschine sollte in die Lage versetzt werden, ein größeres Repertoire an Gangarten auszuführen. Dabei war insbesondere das Ersteigen flacher Treppen vorgesehen. TARRY I war hierzu aufgrund der geringen Leistungen der verwendeten Servomotoren nicht in der Lage.
- Erhöhte Modularisierung
Um den kurzfristigen Austausch von Bauteilen zu Test- oder Reparaturzwecken zu ermöglichen, sollte die Struktur stärker modularisiert werden. Dies galt sowohl für die Konstruktion der Bauteile und der verwendeten Elemente als auch für die Montage bzw. Demontage.
- Verbesserung der Sensorik
Die an TARRY I verwendete Sensorik zur Erkennung des Bodenkontaktes hat verschiedene Schwächen. Neben der bereits angesprochenen Modularisierung

liegt ein besonderes Problem in der exponierten Lage der Verkabelung. Die Anschlüsse bleiben leicht an Hindernissen hängen und werden beschädigt. Eine verbesserte Kabelführungsmöglichkeit sollte deshalb zusätzlich berücksichtigt werden.

Die Neukonstruktion der Gehmaschine besteht hauptsächlich aus Aluminium-Profilen. Auf die Verwendung gebogener Bleche ist aus Gründen der leichteren Austauschbarkeit komplett verzichtet worden. Die beiden Rohre des Zentralkörpers sind durch ein entsprechendes U-Profil ersetzt worden. Wie den Daten aus den Tabellen 1 und 2 entnommen werden kann, sind die Körpermaße leicht gestiegen, insgesamt aber ähnlich geblieben. Die wichtigste Änderung besteht in der Anpassung der Hüftwinkel φ an leichter zu fertigende Werte und die deutliche Verkleinerung dieses Winkels für das hintere Hüftgelenk. Dadurch wird der Tatsache, daß die Aufgabenteilung der Beine nicht der der Stabheuschrecke entspricht, Rechnung getragen. Durch ihre weiterentwickelten Tarsi, die *Carausius morosus* auch das Erklettern von Glasscheiben und das Umfassen schmaler Äste ermöglicht, ist das Insekt in der Lage, die hinteren und mittleren Extremitäten hauptsächlich für die Lokomotion zu verwenden, während die Vorderbeine dem Tasten und Erkunden dienen. Dies wird auch durch den langen Körper, der den Schwerpunkt nach hinten verlagert, unterstützt.

Der Gehmaschine mit ihren einfach ausgeführten Füßen, fehlt die Fähigkeit, sich am Untergrund festzuhalten. Daher beruht die Fortbewegung hier lediglich auf der Reibung zwischen den Tarsi und dem Untergrund. Damit sind die schiebenden Bewegungen des Insektes kaum nachzubilden, da die Hinterbeine der Maschine bei vergleichbaren Gelenkkonfigurationen zu rutschen beginnen. Um die Lokomotion der Maschine zu verbessern, sind die entsprechenden φ -Winkel der hinteren Hüftgelenke verkleinert worden.

Die Forderungen nach verbesserter Sensorik konnten ebenso erfüllt werden, wie die erhöhte Modularität. Die Erhöhung der möglichen Traglast wurde durch die Verwendung von Multiplex Servomotoren der „power“ Serie als Antriebe in den Gelenken erreicht. Die Maschine hat eine Gesamtmasse von ca. 2950 g, erreicht aber durch die deutlich stärkeren Motoren (vgl. Tabelle 3) dennoch eine im Vergleich zu TARRY I deutlich erhöhte Nutzlast. Mit dieser Ausstattung können Steigungen von ca. 15° bewältigt werden. Die hohe Elastizität des Gesamtmechanismus ist dabei erhalten geblieben. Bei der Belastung eines Fußes ohne Bodenkontakt mit einer Kraft von 5 N in Richtung der x -Achse verschiebt sich der entsprechende Fuß, je nach Beinkonfiguration, um über 30 mm in Krafrichtung. Diese Eigenschaft zu berücksichtigen gehört daher mit zu den Aufgaben der vorgestellten Koordinationsmechanismen.

Eine Maschine mit den gleichen Abmessungen und einer ähnlichen Ausstattung, die ebenfalls im Fachgebiet Mechanik gebaut worden ist, wird an der Universität Bielefeld im Fachgebiet Biologische Kybernetik in der Arbeitsgruppe von Professor Cruse betrieben. Sie trägt den Namen TARRY IIB und dient dazu, Simulationen der biologischen Steuerungsarchitektur der Stabheuschrecke zu verifizieren.

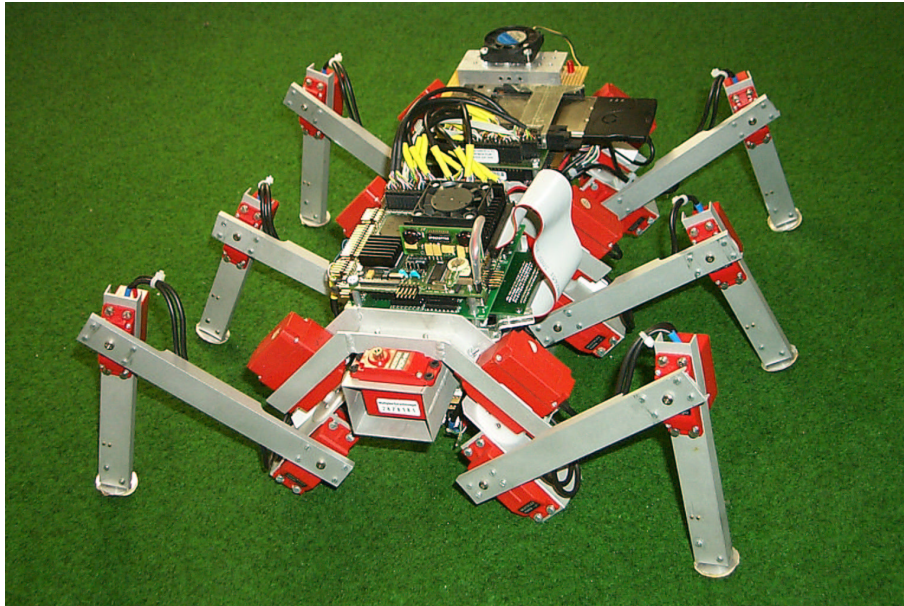


Abbildung 11: Die Gehmaschine TARRY IIA

2.2.3 Tarry IIA

Bei TARRY IIA handelt es sich um die jüngste Weiterentwicklung von TARRY II. Auch wenn in der vorliegenden Arbeit die Kontrollautonomie des Roboters im Vordergrund steht, ist die gleichzeitige Prozessor- und Energieautonomie als höchstes Ziel für eine entsprechende Maschine zu betrachten.

Um zu demonstrieren, daß das vorgestellte Konzept in Verbindung mit dem gebauten Maschinentyp in der Lage ist, prinzipiell auch diese Anforderungen zu erfüllen, ist TARRY IIA gebaut worden.

Der bisher eingesetzte externe Rechner, der die Kontrolle des Roboters über eine Kabelverbindung übernahm, wird hier durch einen auf der Maschine installierten PC/104 Computer [PC/01] ersetzt. Um dies zu ermöglichen, sind kleine Änderungen in den Abmessungen des Zentralkörpers notwendig, die Tabelle 2 entnommen werden können. Über eine Funknetzwerkkarte ist es möglich, die Funktion des Rechners zu beobachten und zu beeinflussen. Der integrierte Rechner und die notwendige Peripherie haben eine Masse von ca. 500 g. Um dieser zusätzlichen Last Rechnung zu tragen und starke Verformungen zu verhindern, mußte die Struktur weiter versteift werden. Dabei wurde darauf geachtet, daß im Inneren des nun geschlossenen Zentralkörpers Raum zur Aufnahme von Akkumulatoren verbleibt, um die Maschine zusätzlich mit einer eigenen Energieversorgung ausstatten zu können. Die Gesamtmasse des Roboters hat sich durch die verschiedenen Maßnahmen auf insgesamt 3100 g erhöht.

Tabelle 1: Beingeometrie der Gehmaschinen und *Carausius morosus* gegenübergestellt

Bein	TARRY					TARRY II				
	φ [°]	ψ [°]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	φ [°]	ψ [°]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]
VL	86	39	35	128	134	85	45	18	145	140
ML	103	41	35	98	118	100	45	18	115	117
HL	132	45	35	110	129	115	45	18	125	130
VR	-86	39	35	128	134	-85	45	18	145	140
MR	-103	41	35	98	118	-100	45	18	115	117
HR	-132	45	35	110	129	-115	45	18	125	130

Bein	<i>Carausius morosus</i>					TARRY IIa				
	φ [°]	ψ [°]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	φ [°]	ψ [°]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]
VL	86	39	1,8	16,0	15,1	85	45	18	145	135
ML	103	41	1,7	12,3	11,6	100	45	18	115	113
HL	132	45	1,7	13,8	13,5	105	45	18	128	125
VR	-86	39	1,8	16,0	15,1	-85	45	18	145	135
MR	-103	41	1,7	12,3	11,6	-100	45	18	115	113
HR	-132	45	1,7	13,8	13,5	-105	45	18	128	125

Tabelle 2: Körpergeometrie der Gehmaschinen gegenübergestellt

	TARRY			TARRY II			TARRY IIa		
	${}^r x_k$ [mm]	${}^r y_k$ [mm]	${}^r z_k$ [mm]	${}^r x_k$ [mm]	${}^r y_k$ [mm]	${}^r z_k$ [mm]	${}^r x_k$ [mm]	${}^r y_k$ [mm]	${}^r z_k$ [mm]
VL	159	55,5	0	148	55,3	0	146	52	0
ML	0	56,5	0	0	55,3	0	0	50	0
HL	-138	48,0	0	-123	56,5	0	-130	48	0
VR	159	-55,5	0	148	-55,3	0	146	-52	0
MR	0	-56,5	0	0	-55,3	0	0	-50	0
HR	-138	-48,0	0	-123	-56,5	0	-130	-48	0

2.3 Elemente der Aktorik und Sensorik

Um Gehmaschinen in die Lage zu versetzen, mit einer a priori unbekanntem Umgebung zu interagieren, müssen sowohl die notwendige Aktorik als auch entsprechende Sensoren vorgesehen werden, mit denen sie diese Umwelt erfassen und bewältigen können.

Zu den Daten, die dabei zu erfassen sind, zählen zuerst die Informationen, welche Beine gerade Bodenkontakt haben oder mit Hindernissen kollidiert sind. Aber auch viele weitere Meßwerte können verwendet werden, um die Möglichkeiten der Maschinen zu steigern. Darunter fallen die mechanischen Beinbelastungen, die Stellungen der Gelenke und die Orientierung der Maschine im Schwerfeld ebenso wie die Lage möglicher Hindernisse vor oder unter der Maschine.

Im Laufe der Entwicklung sind an den verwendeten TARRY Gehmaschinen verschiedene Servomotoren sowie Sensoren und Meßmethoden zum Einsatz gekommen. Allen gemein ist, daß keine besondere Bindung in Form bestimmter Schnittstellen zu der jeweiligen Maschine vorliegt. Es wäre prinzipiell möglich, jedes der verwendeten Elemente an jeder der verwendeten Maschinen zu montieren und einzusetzen. Bedingt durch die fortschreitende Entwicklung und den Einsatzzweck der jeweiligen Maschinen geschieht dies in der Regel nur aufwärtskompatibel, das heißt Sensorik einer älteren Maschine kann auch bei der Montage des Nachfolgers verwendet werden. Aufgrund der prinzipiellen Austauschbarkeit sollen diese Bauteile dennoch unabhängig von den verschiedenen Maschinenmodellen beschrieben werden.

Bei allen verwendeten Elementen wurde darauf geachtet, möglichst robuste, gegen Beschädigung unempfindliche oder entsprechend geschützte Teile zu verwenden, um eventuelle Ausfallzeiten und Kosten gering zu halten. Ein weiteres Ziel war es, nur Bauteile zu nutzen, deren Kosten in einer sinnvollen Relation zum Gesamtpreis der Maschine standen.

2.3.1 Servomotoren

Die zum Antrieb der Gehmaschine verwendeten Servomotoren (Servos) stammen aus der Flugmodelltechnik. Aufgrund dieses ursprünglichen Einsatzzwecks besitzen sie, bezogen auf das Gewicht, ein verhältnismäßig hohes Drehmoment. Die Daten der in den Gehmaschinen eingesetzten Servos sind in Tabelle 3 dargestellt.

Die Servomotoren (siehe Abbildung 12) werden von einem Gleichstrommotor angetrieben, der über ein Metallgetriebe die Steuerscheibenwelle mit dem außen liegenden Ruderhorn stellt. Das Metallgetriebe enthält zwei Kunststoffelemente als Sollbruchstellen bei Überlastung. Das innere Ende der Steuerscheibenwelle ist mit einem Präzisionspotentiometer verbunden. Dieses Potentiometer dient als Drehwinkelgeber. Der mikroprozessor-basierte Regler vergleicht die Soll-Größe der Winkelstellung

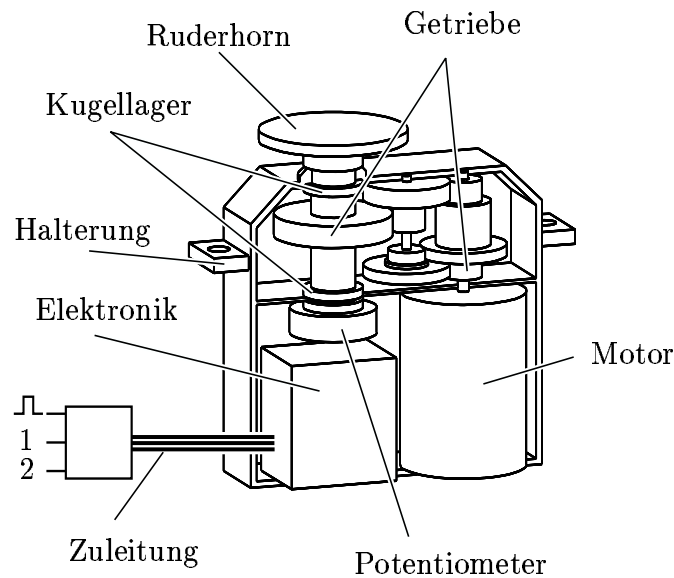


Abbildung 12: Schematische Darstellung eines Multiplex Servomotors

mit der durch den Winkelgeber gegebenen Ist-Position. Im Falle einer Abweichung generiert die Elektronik eine Gleichspannung als Stellgröße, um mit dem Motor den Servo nachzustellen.

Die Soll-Position wird dem Servo mit Hilfe einer pulsmodulierten Eingangsspannung übermittelt. Dabei wechselt der Pegel zwischen 0 V (*Low Level*) und 5 V (*High Level*). Diese Referenzposition wird durch die Dauer Δt_h des High Signales festgelegt. Der Servo hat einen Verfahrweg von ca. $\pm 57^\circ$, wobei sowohl der Nullpunkt als auch der überstrichene Winkel des Verfahrweges durch eine Umprogrammierung der Mikroprozessorsteuerung beeinflusst werden können. Diese Umprogrammierung nimmt ca. 1 s in Anspruch und ist daher während des Betriebs der Maschine praktisch nicht durchführbar. Aus den Grenzen des Verfahrweges und der genauen Einbaulage bestimmen sich auch die geometrischen Grenzen der möglichen Beinbewegungen.

Tabelle 3: Daten der Multiplex Servomotoren

	profi mc	power mc	power mc v2
Abmaße (B \times H \times T)[mm]	36 \times 39 \times 19	44 \times 47 \times 23	47 \times 47 \times 23
Masse [g]	48	75	82
max. Moment [Ncm]	48	120	87
Stellzeit [$^\circ$ /s]	333	250	174
Preis [DM]	ca. 130	ca. 200	ca. 200

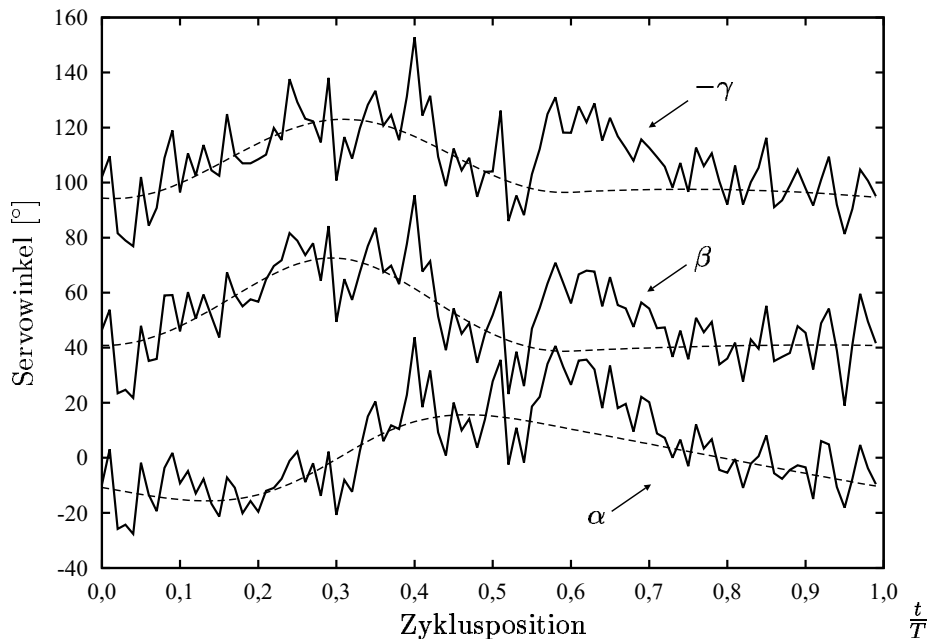


Abbildung 13: Winkelmessung nach AMENDT [Ame95]

Allerdings liegen diese Grenzen in der Regel in Bereichen, die bezüglich der notwendigen Stell- bzw. Haltemomente bereits ausgesprochen ungünstig sind.

Durch einen Umbau des Servos ist es möglich, das Signal des Potentiometers herauszuführen und auch extern zu messen. Zusätzlich kann der vom Motor aufgenommene Strom gemessen und zur Abschätzung der mechanischen Belastung herangezogen werden.

Zwei Schaltungen dieser Art sind bereits in [Ame95] erläutert worden. Beide Schaltungen sind seitdem aber grundlegend verbessert worden und sollen daher an dieser Stelle in ihrer neuen Form vorgestellt werden.

Stellwinkel

In der oben genannten Arbeit war eines der Ziele, die Winkelstellungen der Servomotoren für den Zeitschritt t_{n+1} aus den gemessenen Winkeln des Zeitschritts t_n mit Hilfe neuronaler Netze (siehe Kapitel 4.3) zu generieren. Dabei wurde besonderer Wert auf die hohe Fehlertoleranz dieses Verfahrens gelegt. Daher war es weder notwendig noch erwünscht, eine hohe Genauigkeit der Messung zu erreichen. Die neueren Steuerungsstrategien der Gehmaschine verwenden diese Rückführung der Stellgrößen nicht, sondern verlassen sich auf einen künstlichen Schrittmacher der, in Anlehnung an einen natürlichen rhythmischen Mustergenerator bei Lebewesen, einen Bewegungstakt vorgibt (vgl. Kapitel 4). Bei dieser Steuerungsstrategie

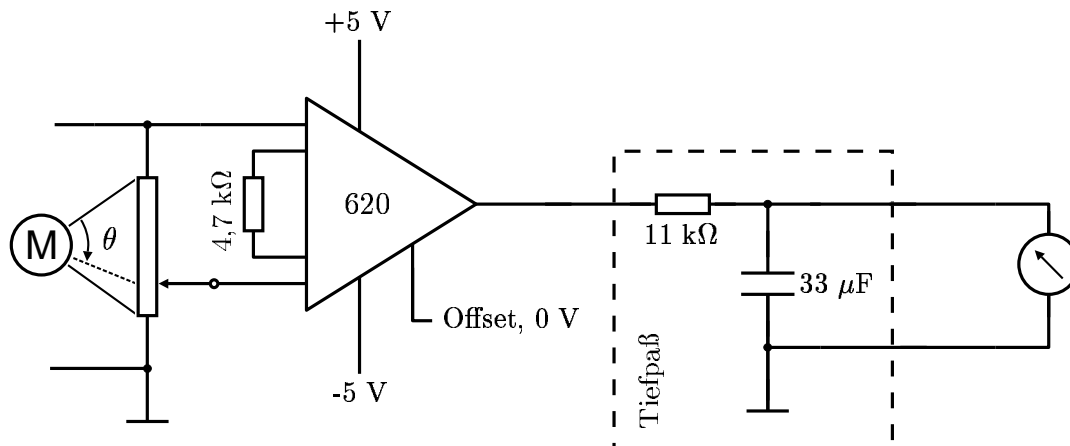


Abbildung 14: Schaltschema der Servo-Winkelmessung

dient die gemessene Gelenkposition lediglich als Zusatzinformation. Eine besondere Genauigkeit ist also auch hier nicht notwendig.

Weitere Exemplare der Gehmaschine TARRY, wie der in Abschnitt 2.2.2 angesprochene TARRY IIb sollen auch als Experimentalplattform für andersartige Steuerungsstrategien verwendet werden. Diese können sich völlig von den in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren unterscheiden. Eine dieser zu testenden Methoden ist die in [CKS⁺98] vorgestellte „positive Rückkopplung“. In diesem Verfahren werden die Winkeländerungen der Gelenke von einem Zeitschritt zum nächsten verwendet, um daraus die weitere Bewegung der Maschine abzuleiten. Erste Versuche mit diesem Algorithmus haben ergeben, daß die Meßgenauigkeit der bisher verwendeten Schaltung dessen Anforderungen nicht genügen kann.

In der bisher verwendeten Meßschaltung wurden die Potentiometersignale gemessen, verstärkt und zur Rauschunterdrückung durch einen Tiefpaß gefiltert. In der Abbildung 13 ist der vorgegebene (gestrichelt) und der gemessene Verlauf (durchgezogen) dargestellt.

Wie zu erkennen ist, weisen die Messungen in beiden Richtungen starke Schwankungen um den vorgegebenen Verlauf auf. Ferner ist zu erkennen, daß in dem Bereich um $0,6 t/T$ eine starke Abweichung von der Vorgabe vorliegt. Hier zeigt sich die deutliche Abhängigkeit dieser Methode vom Belastungszustand der Maschine, da in diesem Bereich ein Wechsel von der sechsbeinigen in eine dreibeinige Standphase stattfindet. Da die in den Servos enthaltenen Gleichstrommotoren und die Potentiometer ihre Spannung aus der gleichen Spannungsquelle beziehen, schlagen sich deren Schwankungen deutlich in den Meßergebnissen nieder. Bei einer Belastung der Motoren und der damit verbundenen Erhöhung der Stromaufnahme kommt es auch zu Schwankungen in der Spannung.

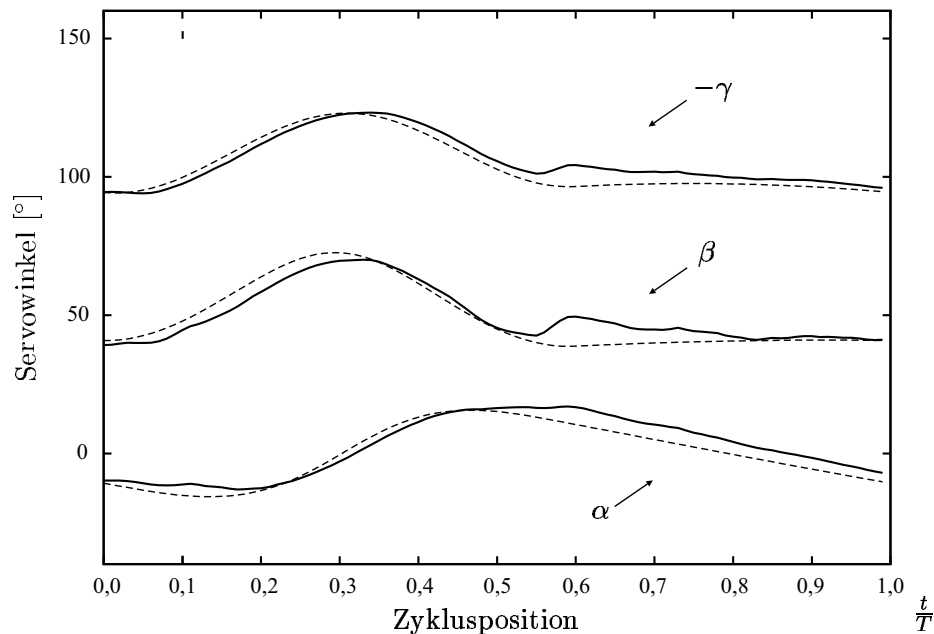


Abbildung 15: Verbesserte Winkelmessung

Da die oben dargestellte Strategie auf der Weiterverarbeitung der Winkeldifferenzen beruht, verhindern die Schwankungen der Meßwerte ein zufriedenstellendes Ergebnis.

In einer verbesserten Schaltung, die in Abbildung 14 dargestellt ist, wird dieses Problem durch die Verwendung eines geeigneten Instrumentationsverstärkers, der beispielsweise in [Sch97] beschrieben wird, gelöst. Mit Hilfe dieser integrierten Version von drei einzelnen Operationsverstärkern ist es möglich, die störenden Gleichtakt-signale zu unterdrücken. Im Anschluß erfolgt ebenfalls eine Tiefpaßfilterung mit einer Eckfrequenz von 2,75 Hz. Durch die Verwendung dieser Schaltung wurde es möglich, die Genauigkeit der Messung deutlich zu steigern. Die entsprechende Messung und die vorgegebenen Winkel sind in Abbildung 15 dargestellt.

Der gemessene Verlauf läßt erkennen, daß die Schwankungen deutlich zurückgegangen sind. Auch hier ist eine leichte Abweichung im Bereich $0,6 t/T$ festzustellen. Mangels einer externen Vergleichsmessung der Winkelverläufe kann nicht genau festgestellt werden, woher die vorhandene Differenz der Messung zu den vorgegebenen Verläufen rührt. Es ist allerdings anzunehmen, daß die Servomotoren durch die durchgängig starke Belastung an dieser Stelle nicht mehr in der Lage sind, die Sollposition zu erreichen um den Fehler komplett auszuregeln.

Mit der neuen Meßmethode läßt sich eine deutliche Verbesserung des Ergebnisses erreichen. Damit wird auch die Erprobung anderer als der in dieser Arbeit vorgestellten Steuerungsstrategien möglich.

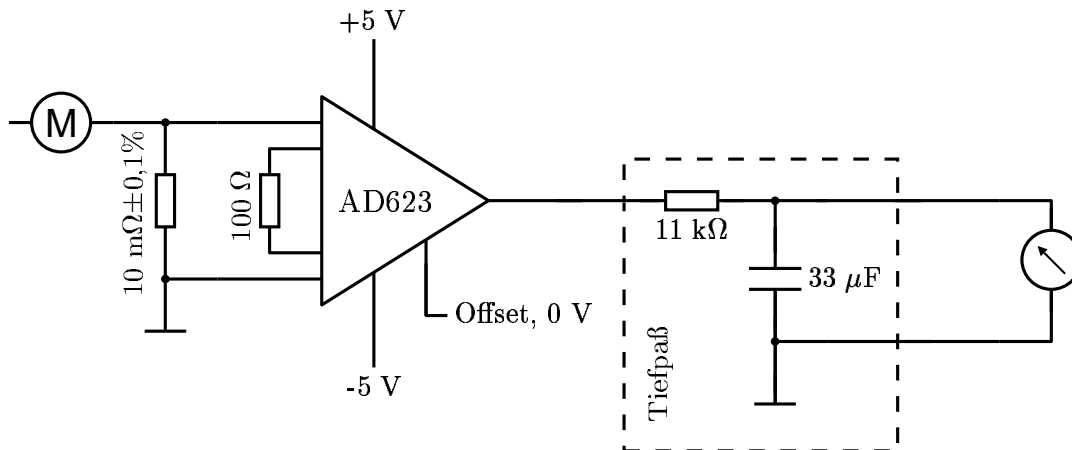


Abbildung 16: Schaltschema der Servo-Strommessung

Servoströme

Wird ein Beinsegment in seiner Bewegung behindert, so erhöht sich die Leistungsaufnahme des antreibenden Servomotors. Bei gleichbleibender Spannung äußert sich dies in einer steigenden Stromaufnahme.

Die Stromaufnahme eines Servomotors kann mit der in Abbildung 16 gezeigten Schaltung ermittelt werden. Um mit gängigen Meßkarten arbeiten zu können, wird der durch den Servostrom über einen Meßwiderstand erzeugte sehr kleine Spannungsabfall auf einen erweiterten Bereich verstärkt. Zusätzlich wird das Ausgangssignal mit einem RC-Tiefpaßglied mit einer Eckfrequenz von ca. 2,75 Hz gefiltert.

Diese Schaltung ist bei allen Gehmaschinen nur für die α -Servomotoren installiert. Da diese Servomotoren die Hauptlast für die Lokomotion in die Maschinenlängsrichtung und den Kurvenlauf tragen, wirken sich Beinkollisionen auch hauptsächlich in diesen Servomotoren aus. Es ist allerdings zu beachten, daß diese Messung nur während der Schwingphase, also wenn das Bein keinen Bodenkontakt hat, zuverlässig ist. In der Stemmphase stützt und bewegt das Bein die Maschine. Dadurch steigt bereits die Grundbelastung so stark an, daß eine weitere Belastung durch eine Kollision nicht erkannt werden kann.

In Abbildung 17 ist ein solcher Meßschrieb für die Kollision mit einem Hindernis in der Schwingphase beim Gang in der Ebene dargestellt. Die Stemmphasen sind im Diagramm grau hinterlegt. Deutlich sind die Kollisionen im dritten und sechsten Schritt zu erkennen.

Um eine genauere Detektion zu erreichen, ist es notwendig, diese Methode mit der Messung weiterer Daten zu kombinieren.

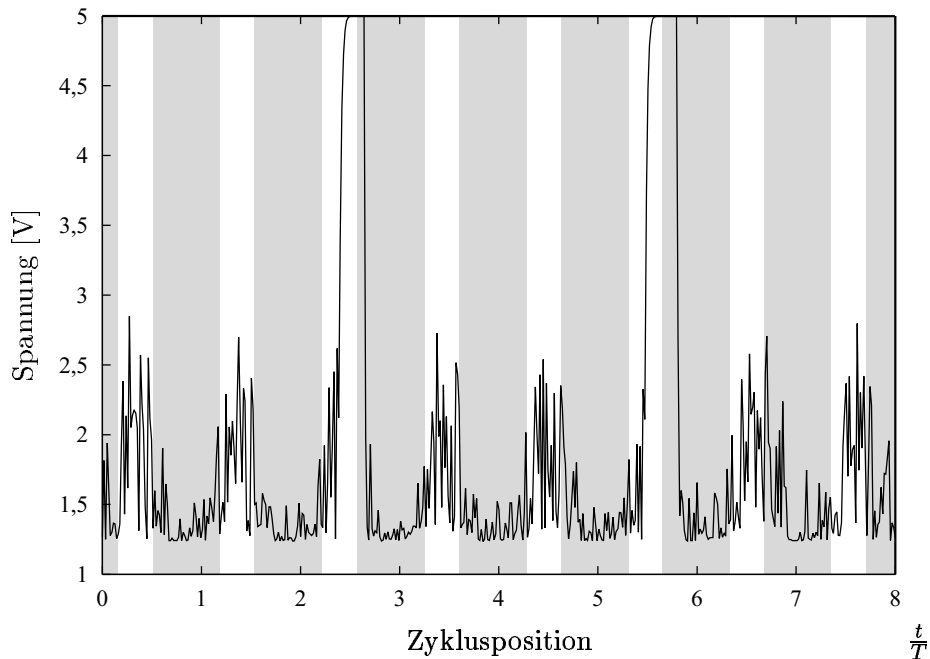


Abbildung 17: Daten der Servobelastungsmessung

2.3.2 Aufstandssensor

Das wichtigste Element zur Koordination von Gangbewegungen ist die Kenntnis der aktuellen Bodenkontakte jedes Fußes. Durch die Elastizität der verwendeten Maschinen ist dieser Wert, selbst bei ebenem Untergrund, nicht einwandfrei aus den Gelenkwinkeln zu ermitteln. Bei unbekanntem, unebenem Gelände ist dies sogar prinzipiell unmöglich. Daher muß ein entsprechender Sensor, hier Aufstandssensor genannt, für jedes Bein den aktuellen Bodenkontakt bestimmen.

Das Herzstück des (bei TARRY II und TARRY IIa) eingesetzten Aufstandssensors besteht aus einem Subminiaturtaster D2MQ-1L--105 der Firma Omron, dessen Daten in Tabelle 4 dargestellt sind.

Die Messung des eigentlichen Bodenkontaktes erfolgt über einen in Abbildung 18 schematisch dargestellten mechanischen Taster. Mit Hilfe des gezeigten Umlenkme-

Tabelle 4: Subminiaturtaster des Aufstandssensors [Omr00]

Abmaße (B × H × T) [mm]	6,5 × 8,3 × 2,7
Gewicht [g]	0,3
Betätigungskraft [N]	0,3
Preis [DM]	ca. 3,95

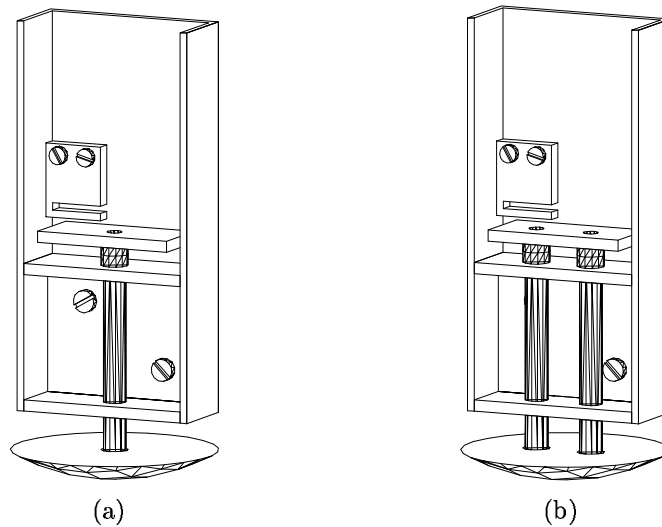


Abbildung 18: Fußtaster mit einfacher (a) und doppelter (b) Führung

chanismus wird bei einem Bodenkontakt des Fußes der Stromkreis des Tasters geöffnet. Die Messung der über einen Widerstand im Stromkreis abfallenden Spannung detektiert dann einen entsprechenden Anstieg. Geht das Bein in die Schwingphase über, so verliert der Fuß seinen Bodenkontakt. Durch das Eigengewicht des Fußes wird der Umlenkmechanismus wieder in seine Anfangsposition bewegt und die gemessene Spannung fällt wieder entsprechend ab.

Die öffnende Funktion des Tasters wurde gewählt, um insbesondere Fehler in der Verkabelung leichter zu erkennen zu können. Wenn die Maschine angehoben wird und die entsprechenden Spannungen nicht abfallen, ist entweder der Sensor selbst defekt oder verklemmt, oder ein Kabel ist beschädigt. Besonders Wackelkontakte oder Kabelbrüche sind so einfacher zu erkennen, da eine mechanische Fehlfunktion des Sensors bei entsprechender Lage der Füße leicht auszuschließen ist. Im Vergleich zu der weniger geschützt montierbaren Verkabelung der Sensoren von TARRY I treten allerdings auch deutlich weniger Defekte dieser Art auf.

2.3.3 Dehnungsmeßstreifen

Um den Verlauf der Belastungen der Extremitäten exakter bestimmen zu können, sind an den Beinen Dehnungsmeßstreifen (DMS) appliziert worden. Mit den DMS ist es möglich, die (elastischen) Verformungen, die sich aufgrund der von außen wirkenden Kräfte und Momente in einem Bauteil einstellen, zu messen.

Bei der Verwendung von DMS wird der Effekt genutzt, daß sich der ohmsche Widerstand eines stromdurchflossenen Leiters bei einer Längung proportional zu seiner Längenänderung verhält. DMS haben für die verwendeten Maschinen den Vorteil,

daß sie besonders klein und leicht sind. Ebenso ist die nicht vorhandene Ansprechschwelle für den geplanten Einsatzzweck von Vorteil. Problematisch ist hauptsächlich die hohe Beschädigungsgefahr und die Notwendigkeit, die extrem schwachen Widerstandsänderungen möglichst nah am Montageort zu verstärken, um Verfälschungen zu vermeiden.

Ziel der DMS Messung ist in diesem Fall nicht die genaue Bestimmung der von außen wirkenden Kräfte und Momente, sondern die Erfassung von typischen Belastungsverläufen. Aus dem Vergleich der für eine Gangart üblichen Verläufe und den gemessenen Zeitreihen soll dann ermittelt werden, ob, und wenn ja, welche Störung des Ganges vorliegt. Aufgrund dieses eher biologischen Konzeptes ist es auch möglich, die Dehnungsmeßstreifen in einer ungewöhnlichen Art zu verschalten. Die DMS zur Messung von Biegung und Torsion werden zusammen in einer Meßbrücke verschaltet. Mit dieser Kombination ergibt sich nach experimenteller Ermittlung der korrekten Verstärkung ein für die Laufsituationen charakteristisches Ausgangssignal. Durch die Kombination dieses Signals mit den Daten der Aufstandssensoren und der Servoströme wäre es möglich, die Erkennung von Hindernissen zu verbessern und eventuell die Reaktionszeiten zu vermindern. Die Ergebnisse der DMS Messung werden in dieser Arbeit nicht weiter verwendet, stünden aber erweiterten Methoden zur Verfügung.

Naturgemäß müssen die DMS direkt auf das betreffende Bauteil appliziert werden. Wiederverwendbar ist dabei die zugehörige Verstärkerschaltung, die in der Nähe der Meßstelle angebracht wird. Durch entsprechend miniaturisierte Bauteile ist es möglich, die Verstärkerschaltung direkt am Bein zu plazieren.

2.3.4 Inklinometer

Um es den Maschinen zu ermöglichen, in unbekanntem Gelände die Orientierung des Zentralkörpers koordiniert zu beeinflussen, ist es notwendig, die aktuelle Orientierung messen zu können.

Bei dem an den Gehmaschinen verwendeten Sensor handelt es sich um das Modell ADXL202 der Firma Analog Devices. Der ADXL202 ist ein zweiachsiger Beschleunigungssensor, der auch zur Neigungsmessung eingesetzt werden kann. Die Beschleunigung wird über einen Differentialkondensator gemessen. Wie in Abbildung 19(a) gezeigt, ist diese Schaltung aus den zwei feststehenden Platten P_1 und P_3 sowie der horizontal verschieblichen Platte P_2 aufgebaut. Membrane an den beiden Seiten des beweglichen Balkens erzeugen entsprechende Rückstellkräfte. Ändert der mittlere Balken seine Position, so ändert sich die Kapazität der beiden Kondensatoren, die aus P_1 und P_2 bzw. aus P_2 und P_3 gebildet werden.

Diese Kapazitätsänderung wird durch die integrierte Elektronik in die Pulsweitenänderung eines Signals und in eine dazu proportionale Spannung umgewandelt.

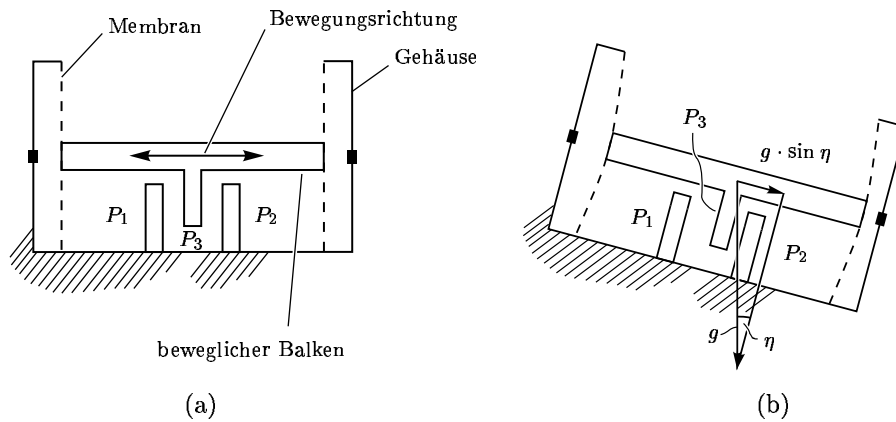


Abbildung 19: Prinzip des Beschleunigungsmessers ADXL202

Bei einer Schräglage des Sensors beeinflusst die Erdbeschleunigung die Lage der mittleren Kondensatorplatte, wie in Abbildung 19(b) zu sehen ist. Diese Verschiebung der Kondensatorplatte wird von dynamischen Effekten überlagert. Da der Sensor nicht in der Lage ist, statische und dynamische Anteile zu trennen, treten insbesondere bei Sprüngen der Eingangsgröße, also der Neigung der Maschine, die Resultate der an der beweglichen Platte wirkenden Trägheitskräfte in Erscheinung. In Abbildung 20 ist die Sprungantwort des Sensors auf eine plötzliche Neigungsänderung von fünf Grad dargestellt. Deutlich ist der Ausschlag des Systems in die entgegengesetzte Richtung sowie der überschwingende Einschwingvorgang selbst zu erkennen. Um das Ausgangssignal des Sensors für die gewünschten Einsatzzwecke verwenden zu können, wird das Signal mit einem RC-Tiefpass mit einer Frequenz von 3,9 Hz gefiltert. Das Ergebnis ist in Abbildung 21 dargestellt. Der gemessene Ausschlag in die Gegenrichtung ist deutlich reduziert und das Signal nähert sich dem Endwert ohne Überschwingen exponentiell an. Die Geschwindigkeit des gefilterten Sensors ist für den geforderten Einsatzzweck völlig ausreichend.

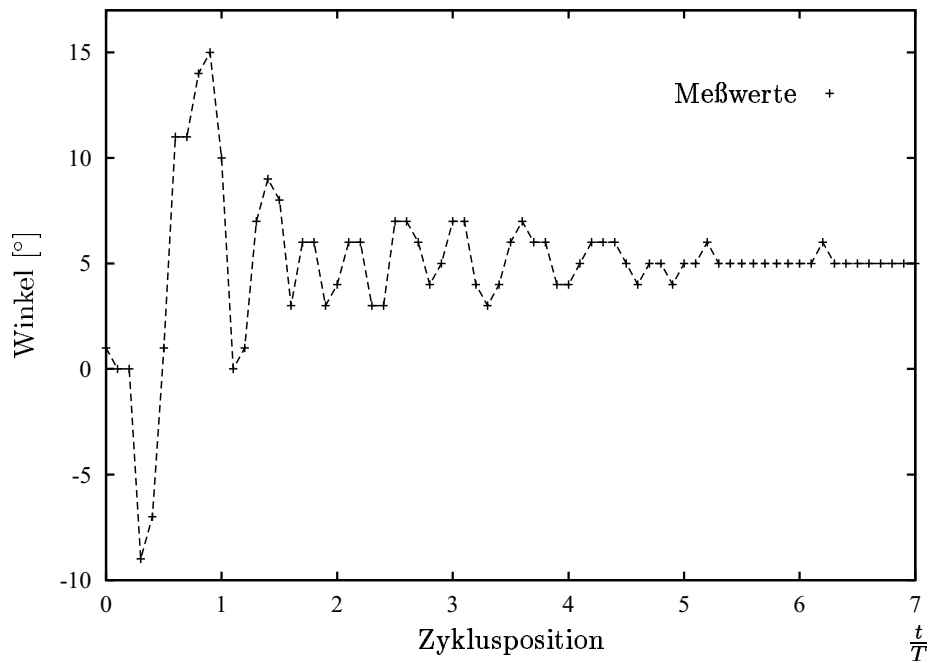


Abbildung 20: Sprungantwort (5°) ungefiltert

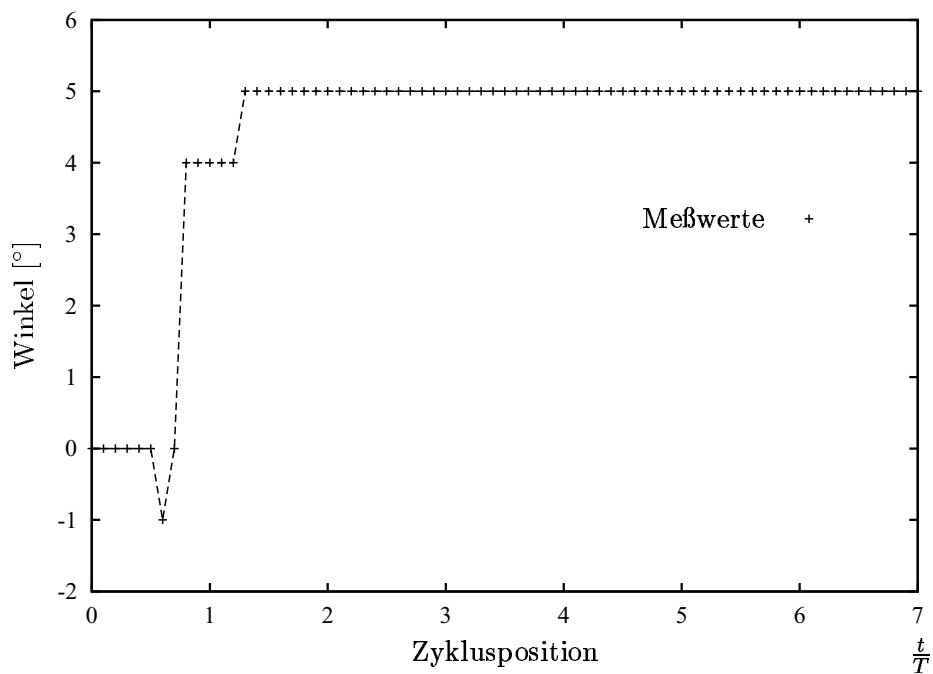


Abbildung 21: Sprungantwort gefiltert mit $T = 0,256$ s

2.3.5 Ultraschallsensor

Ultraschallsensoren zählen zu den elektroakustischen Entfernungsmessern. Durch die Ausstrahlung eines kurzen Schallsignals über den Transmitter wird die Messung eingeleitet. Über die Laufzeit, die die an Hindernissen reflektierten Signale benötigen um den Receiver zu erreichen, ist die Entfernungsberechnung für Objekte, die im Bereich der Schallkeule des Sensors liegen, möglich.

Die alternativ in Versuchen verwendeten Sensoren UC2000-30GM-IU-V1 von Pepperl+Fuchs (PuF) und der Polaroid 8665 arbeiteten dabei beide als sogenannte Transponder, daß heißt, Sende- und Empfangseinheit sind in einem Schallkopf integriert. Die verwendeten Transponder arbeiten mit Frequenzen von 175 kHz bzw. 50 kHz, und damit deutlich oberhalb der unteren Grenze des Ultraschallbereichs, die bei ca. 20 kHz liegt.

Die Entfernung eines Hindernisses berechnet sich aus der Laufzeit Δt mit:

$$s = \frac{1}{2} c_{Schall} \Delta t$$

mit der Schallgeschwindigkeit als

$$c_{Schall} = \sqrt{\kappa R T}.$$

Da der Isentropenexponent bei den üblichen Umgebungsbedingungen seinen Wert von $\kappa \approx 1,4$ kaum ändert, bleibt das Produkt von κ und der molaren Gaskonstante R praktisch gleich. Damit ist die Schallgeschwindigkeit weitgehend von der Umgebungstemperatur abhängig. Hier liegt der größte Vorteil des Ultraschallsensors von PuF. Während der Polaroid Sensor vor jedem Einsatz entsprechend kalibriert werden muß, bietet der Alternativsensor eine automatische Temperaturkompensation, die auch während des Betriebs nachgeführt wird.

Tabelle 5: Daten der Ultraschallsensoren

	Polaroid Typ 8665	Pepperl+Fuchs UC2000-30GM-IU-V1
φ_{min} [°]	11	10
φ_{max} [°]	19	25
Größe (d × l) [mm]	43 × 12	28 × 113
Gewicht [g]	8	179

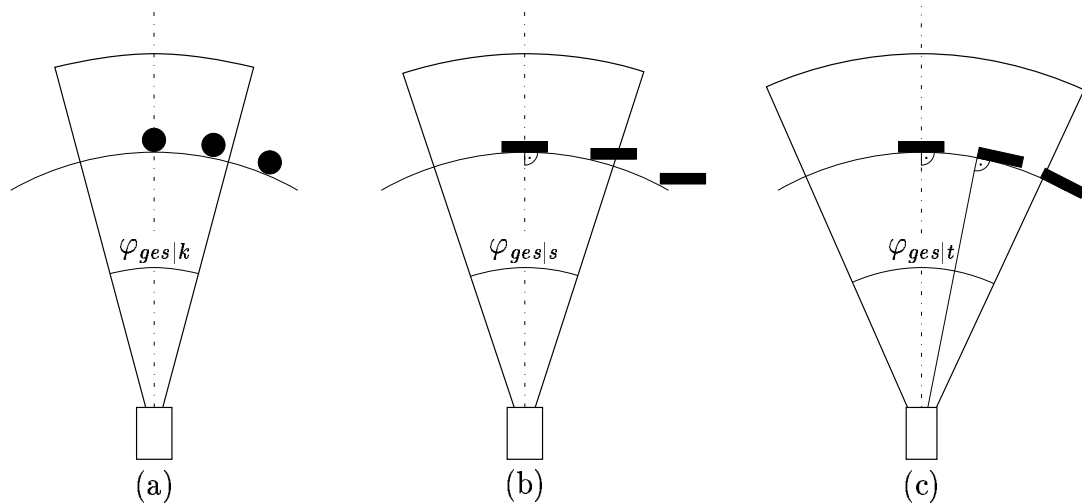


Abbildung 22: Versuchsanordnung zur Bestimmung des Öffnungswinkels mit
 (a) Zylindern, (b) Quadern senkrecht zur Sensorlängsachse
 und (c) Quadern tangential zum Radius $r = 750$ mm

Wie sich in einer Reihe von Versuchen herausgestellt hat, bietet der PUF Sensor, trotz der laut Herstellerangaben besseren Kennwerte, ansonsten keine nennenswerten Vorteile bei der Messung. Insbesondere fielen die Unterschiede der Kegelöffnungswinkel φ , die mit Versuchsanordnungen wie in Abbildung 22 bestimmt wurden, geringer aus als erwartet. Aufgrund des deutlich geringeren Gewichtes wurde daher an der Maschine selbst der Sensor der Firma Polaroid eingesetzt. Der Gewichtsvorteil rechtfertigt selbst die schwierigere Auswertung der Daten durch Laufzeitmessung im Vergleich zur einfachen Auswertung einer Spannung proportional zur ermittelten Entfernung bei dem PUF Sensor.

Bei den Versuchen hat sich auch gezeigt, daß die Kennlinie der Sensoren tatsächlich praktisch linear verläuft. Daher ist die Auswertung der Meßsignale ausgesprochen einfach zu bewerkstelligen. Wenn der Sensor mit einem Servomotor drehbar auf der Maschine angebracht wird, ist es somit möglich, einen Bereich von annähernd 180° vor der Maschine zu überstreichen. Dabei muß allerdings berücksichtigt werden, daß der Sensor nur in der Lage ist, Hindernisse ab einer bestimmten Größe zu erkennen. Der Ultraschallsensor dient also hauptsächlich dazu, Kollisionen mit großen, unüberwindlichen Hindernissen zu vermeiden. Zu diesem Zweck wird in Abschnitt 5.3.1 eine einfache Methode zur Umgehung erkannter großer Hindernisse vorgestellt.