

**Khaldoun Abaza**

**Ein Beitrag zur Anwendung der Theorie  
undulatorischer Lokomotion auf mobile Roboter**



**Ein Beitrag zur Anwendung der  
Theorie undulatorischer Lokomotion  
auf mobile Roboter**

Evaluierung theoretischer Ergebnisse an Prototypen

Von Khaldoun Abaza



Universitätsverlag Ilmenau  
2007

# Impressum

## **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Angaben sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau als Dissertation vorgelegen	
Tag der Einreichung:	5. April 2006
1. Gutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. K. Zimmermann, TU Ilmenau
2. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. J. Grabow, FH Jena
3. Gutachter:	Doz. Dr. V. T. Minchenija, BNTU Minsk (Belarus)
Tag der Verteidigung:	7. Dezember 2006

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

**Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

[www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag](http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag)

## **Herstellung und Auslieferung**

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

[www.mv-verlag.de](http://www.mv-verlag.de)

ISBN 978- 3-939473-12-1

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2006000223

# Kurzfassung der Dissertation

Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen undulatorische Lokomotionssysteme. In diesem Zusammenhang wurden die Begriffe **Undulation** und **Lokomotion** definiert. Die gerichtete Ortsveränderung natürlicher oder technischer Systeme ist generell als Lokomotion zu verstehen, aber es erweist sich als schwierig, eine aus Sicht der Mechanik umfassende Definition des Begriffes Lokomotion zu geben. Er wurde in dieser Arbeit, mathematisch, wie folgt beschrieben: Lokomotionssysteme sind technische Systeme, die in der Lage sind, alle ihre Punkte in einem ausgewählten charakteristischen Zeitintervall zu bewegen, wobei durchaus Größe und Richtung der Lageänderung der Punkte verschieden sein können.

Die Mechanik versteht unter Undulation die Bewegung durch eine Erregung der Aktuatoren des Systems, die sowohl von außen kommen oder im Inneren erzeugt werden kann. Der Aktuator erzeugt seinerseits eine in der Regel periodische Gestaltänderung, welche durch die Wechselwirkung mit der Umgebung eine globale Lageänderung erzeugt.

In der vorliegenden Arbeit wurden undulatorische Lokomotionssysteme theoretisch und mittels zweier entwickelter Prototypen untersucht.

Der Prototyp (TM-ROBOT) wurde nach dem undulatorischen Bewegungsprinzip des Regenwurms (Längenänderung von Segmenten) aufgebaut. Ein Bewegungssystem, das für die Bewegung das peristaltische Bewegungsprinzip nutzt, bewegt sich mit periodischen Verformungen seines Körpers und nichtsymmetrischen Reibkräften unter Einbeziehung der Wechselwirkung mit der Umgebung.

Der Prototyp (MINCH-ROBOT) im Rahmen dieser Arbeit ist ein Mikroroboter, der keine klassische undulatorische Lokomotion umsetzt. Er besteht aus einem Piezoaktuator und ist mit zwei passiven Beinen und einem Schwanz ausgerüstet. Die Undulation besteht in der Übertragung von den hochfrequenten Schwingungen seines Körpers (Piezoaktuator) auf die Beine. Somit werden komplexe räumliche Trajektorien der Beinendpunkte erzeugt. Bei dem Steuerprinzip dieses Mikroroboters spielt die Nichtsymmetrie der beiden Beine eine wesentliche Rolle. Diese (absichtlich realisierte) Nichtsymmetrie zwischen rechtem und linkem Bein ist die Ursache für eine Verschiebung der Resonanzbereiche der Beine. Damit wird der Roboter in seiner Richtung steuerbar.

Numerische Simulationen der beiden Prototypen und Messungen an realem Objekt stützen die Theorie dieser Arbeit, die sich somit in das breite Feld der Lokomotionssysteme eingliedert.

## Abstract of the thesis

Undulatory locomotion systems are located in the centre of this thesis. That is why it was important to define the terms **undulation** and **locomotion**. Locomotion is generally defined as the directed change of location of natural or technical systems. But it turns to be difficult to give a comprehensive definition of the term locomotion from the viewpoint of mechanics. It was mathematically described in this thesis as follows:

Locomotion systems are technical systems, which are able to move all their points in a selected characteristic time interval with same or different amount and direction.

Mechanics understand undulation as an excitation of the actuators, which comes from the outside or the inside of the system. Then the actuators produce (usually) a periodic change of shape, which causes a global change of location of the system through interaction with the environment.

In this thesis, undulatory locomotion systems are developed by means of two prototypes.

The prototype (TM-ROBOT) was developed according to the undulatory (peristaltic) movement principle of the earthworm (length variation of segments). A system, which uses the peristaltic motion principle for the movement, means that this system moves itself through periodic deformations of its body, non-symmetric friction forces and interaction with the environment.

The prototype (MINCH-ROBOT) is a micro robot, which does not convert a classical undulatory locomotion. It consists of a piezo actuator and is equipped with two passive legs and a tail. His undulation is produced through transmission of the high frequency vibrations of its body (piezo actuator) on the legs. Thus complex spatial trajectories of the leg endpoint can be produced. The unsymmetry of the two legs plays a substantial role to control this prototype. This (on purpose realized) unsymmetry between right and left leg is the cause for a shift of the resonance ranges of the legs. Thus the robot becomes controllable in its direction.

Numeric Simulations of the two prototypes and measurements of the material object support the theory of this work, which is thus integrated with the broad field of the locomotion systems.

# Inhaltverzeichnis

<b>Verwendete Symbole</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2 Aufgaben, Ziele und Aufbau der Arbeit</b>	<b>11</b>
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>15</b>
3.1 Allgemeine Grundlagen	15
3.2 Biologisch inspirierte Robotik mit dem Schwerpunkt undulatorischer Lokomotionssysteme	16
<b>4 Mathematisch-mechanische Grundlagen für wurmartige Lokomotionssysteme</b>	<b>29</b>
4.1 Modellbildung	29
4.1.1 Allgemeine Betrachtungen	29
4.1.2 Physikalisches Modell des Wurms	30
4.1.3 Mathematisches Modell des Wurms	33
4.1.4 Bewegungsprinzip	35
4.2 Lokomotion	36
4.2.1 Vorbemerkung	36
4.2.2 Definition des Begriffes Lokomotion	38
<b>5 Prototyp I (TM-ROBOT)</b>	<b>43</b>
5.1 Prototyp-Aufbau	43
5.2 Motivation für die Nutzung nichtsymmetrischer Reibung	44
5.3 Verwendung einer Spikesstruktur	46
5.4 Bestimmung von Reibkoeffizienten	47
5.5 Steuersoftware	49
5.6 Verbindung von Simulations- und Steuersoftware	49
5.7 Zur Dynamik des TM-ROBOT	51
5.7.1 Bewegungsbedingungen für die Lokomotion im Kontext der Gaits	51

5.7.2	Bewegungsbedingungen für die Lokomotion im Kontext der Kräfte . . . . .	61
5.8	Bewegungsalgorithmen (Gaits) . . . . .	64
5.9	Steuerung der Elementgeschwindigkeiten des TM-ROBOT mit ausgewählten Gaits . . . . .	66
5.10	Wurmroboter auf geneigter Ebene - Bestimmung des maximalen Steigungswinkels . . . . .	71
5.10.1	Lokomotion mit einem bewegten Massepunkt . . . . .	71
5.10.2	Lokomotion mit zwei bewegten Massepunkten . . . . .	74
5.10.3	Das Inverse Problem . . . . .	75
5.11	Wegmessungen am TM-ROBOT . . . . .	77
5.11.1	Messprinzip (Berührungslose laseroptische Wegmessung) . .	77
5.11.2	Messungen am TM-ROBOT und Auswertung . . . . .	78
<b>6</b>	<b>Piezobasiertes Lokomotionssystem MINCH-ROBOT</b>	<b>83</b>
6.1	Einführende Bemerkungen und Motivation . . . . .	83
6.2	Bewegungs- und Steuerungsprinzip . . . . .	84
6.3	Finite-Elemente-Modell des MINCH-ROBOT . . . . .	86
6.4	Massenpunktsystem-Modell des MINCH-ROBOT . . . . .	88
6.4.1	Modell und Ableitung der Bewegungsdifferentialgleichungen	88
6.4.2	Simulationsrechnungen und Diskussion der Ergebnisse . . .	94
6.5	Experimentelle Untersuchungen am MINCH-ROBOT . . . . .	97
6.5.1	Geschwindigkeitsmessungen bei verschiedenen Oberflächen .	97
6.5.2	Einsatz von Bildverarbeitungssoftware und high speed Kamera	102
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>107</b>
	<b>Anhang</b>	<b>111</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>115</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>123</b>
	<b>Thesen zur Dissertation</b>	<b>125</b>



## Verwendete Symbole

$a$	Abstand zwischen dem Kopf des Mikroroboters und dem Massenschwerpunkt (im mathematischen Modell)
$A$	Massenpunkt
$\hat{A}$	Amplitude der Schwingung des Beines des Mikroroboters
$\hat{A}_{Trans}$	Amplitude der Transversalschwingung
$\hat{A}_{Long}$	Amplitude der Longitudinalschwingung
$b$	Breite des Piezoaktuators in der FEM-Berechnung
$B$	Massenpunkt
$c_{ij}$	Federsteifigkeit der Feder, die die Massenpunkte $i$ und $j$ verbindet
$D$	Massenpunkt
$\bar{D}$	abgeschlossenes Gebiet
$\vec{e}_x, \vec{e}_y$	raumfeste Einheitsvektoren
$\vec{E}_x, \vec{E}_y, \vec{E}_z$	körperfeste Einheitsvektoren
$E$	Elastizitätsmodul (in dieser Arbeit nur für Stahl verwendet)
$f$	Frequenz
$\vec{F}_i, \vec{F}_D$	Antriebskräfte
$\hat{\vec{F}}, \hat{\vec{F}}_D$	periodische Antriebskräfte
$\vec{F}_0, \vec{F}_+, \vec{F}_-, \vec{F}_{R_A}, \vec{F}_{R_B}$	Reibkräfte
$\vec{F}_i^{(e)}$	eingeprägte Kraft

$\vec{F}_i^z$	Zwangskraft
$\vec{g}$	Erdbeschleunigung
$\vec{G}_i$	äußere eingeprägte Kräfte auf die Masse $i$
$h$	Höhe des Piezoaktuators in der FEM-Berechnung
$h(.,a,b)$	Abschneidefunktion mit Intervallgrenzen $a$ und $b$
$J$	Massenträgheitsmoment
$k, k_+, k_-$	Reibkoeffizienten
$l$	Länge des Beines des Mikroroboters
$l_0$	Länge des nicht deformierten Wurms
$l_j(.)$	Abstandsfunktion zwischen den Massenpunkten $j$ und $j-1$
$l_{i\max}, l_{i\min}$	Maximal- bzw. Minimalwert für den Abstand zwischen den Teilmassen
$\dot{l}_i(.), \ddot{l}_i(.)$	Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung von $l_i(.)$
$\dot{l}_i(0)$	Anfangsbedingung
$L$	Länge des Piezoaktuators in der FEM-Berechnung und im mathematischen Modell
$L_i(.)$	Summe der Abstandsfunktionen $l_j(.)$ vom Kopf bis Masse $i$ mit $j = 1, 2, \dots, i$
$m, M$	Massen
$m_i$	Körpermasse bzw. Masse des $i$ -ten Massenpunktes
$m_s$	Masse des Massenschwerpunktes
$\hat{m}$	Zahl der Massenpunkte, die nicht in Bewegung sind
$\vec{M}_s$	Drehmoment
$\tilde{M}$	Menge aller inneren Punkte eines Körpers
$\hat{n}$	Zahl der Massenpunkte, die in Bewegung sind
$\vec{N}_A, \vec{N}_B$	Normalkraft auf Massenpunkt A bzw. B

---

$P$	materieller Punkt eines Körpers
$\vec{r}_A, \vec{r}_B$	Ortsvektoren der Massenpunkte A und B
$\vec{r}_S$	Ortsvektor des Massenschwerpunktes
$\ddot{\vec{r}}_S$	Beschleunigungsvektor des Massenschwerpunktes
$\vec{R}_i$	Zwangskraft auf Masse $i$
$R_k$	Kurbellänge
$R_z$	Rauheitstiefe einer Oberfläche
$\mathbb{R}_+$	Intervall der reellen Zahlen $[0, \infty)$
S	Massenschwerpunkt
$\overline{SA}, \overline{SB}$	Ortsvektor von A bzw. von B bezüglich S
$t$	Zeitvariable
$T$	Zeitintervall bzw. Zeitperiode
$\vec{u}(\cdot)$	Verschiebung eines Punktes eines Körpers
$\vec{U}(\cdot)$	Verschiebung aller Punkte eines Körpers
$\vec{U}_m$	mittlere Verschiebung aller Punkte eines Körpers
$\vec{U}_S$	Verschiebung des Massenschwerpunktes eines Körpers
$v, v_{Max}$	Geschwindigkeit bzw. maximale Geschwindigkeit
$\vec{v}_A, \vec{v}_B$	Geschwindigkeiten der Massenpunkte A und B
$V$	Volumen eines Körpers
$V_0$	Geschwindigkeit des ersten Massenpunktes $x_0$
$w$	unbekannter (im Rahmen der Kinematik) Starrkörperanteil der Geschwindigkeit
$x_i(\cdot), x_j(\cdot)$	Lage des $i$ -ten Massenpunktes, Lage des $j$ -ten Massenpunktes
$x_A, x_B$	$x$ -Koordinaten der Massenpunkte A und B

$\dot{\vec{x}}_A, \dot{\vec{x}}_B$	Geschwindigkeitsvektoren der Massenpunkte A und B
$x_S$	x-Koordinate des Massenschwerpunktes
$\dot{x}_i(\cdot)$	Geschwindigkeit des $i$ -ten Massenpunktes
$\dot{x}_i(0)$	Anfangsbedingung
$\ddot{x}_i(\cdot)$	Beschleunigung des $i$ -ten Massenpunktes
$y_A, y_B$	y-Koordinaten der Massenpunkte A und B
$\dot{\vec{y}}_A, \dot{\vec{y}}_B$	Geschwindigkeitsvektoren der Massenpunkte A und B
$y_S$	y-Koordinate des Massenschwerpunktes
$\alpha$	Winkel zwischen dem Bein des Mikroroboters und seinem Körper
$\hat{\alpha}$	Winkel der Wurmbewegung bezüglich der Borstenstruktur (Spikes)
$\tilde{\alpha}$	maximaler Steigungswinkel, den das Wurmssystem beim Hochklettern überwinden kann
$\tilde{\alpha}_1$	maximaler Steigungswinkel für Gaits mit zwei sich zu jeder Zeit bewegenden Massepunkten
$\tilde{\alpha}_2$	maximaler Steigungswinkel für Gaits mit einem sich zu jeder Zeit bewegenden Massepunkt
$\varepsilon(\cdot)$	gegebene Längsdehnungsfunktion des Wurms (kinematisches Gait)
$\varphi$	Phasendifferenz
$\varphi_0$	Phasenwinkel
$\Phi(\cdot)$	Funktion der COULOMBSchen Reibkräfte
$\mu, \mu_+, \mu_-$	Reibkoeffizienten
$\Gamma$	Grenze eines Körpers
$\rho$	Dichte (in dieser Arbeit nur für Stahl verwendet)
$\tau$	Zeitintervall einer Periode
$\theta$	Winkel zwischen dem Schwanz des Mikroroboters und der x-Achse

---

$\theta(\cdot)$	Winkelfunktion
$\dot{\theta}(\cdot)$	Winkelgeschwindigkeitsfunktion
$\nu$	Querkontraktionszahl (in dieser Arbeit nur für Stahl verwendet)
$\omega$	Eigenkreisfrequenz
$\xi$	körperfeste Koordinate
$\xi_0, \xi_1, \xi_2$	Lagen der Massenpunkte im Moment $t = T$
$\xi^i$	Ortsvektor eines Punktes
$\xi_s^i$	Ortsvektor des Mittelpunktes
$\psi_0$	Phasenwinkel



# 1. Kapitel

## Einleitung

Natürliche Systeme besitzen in der Sprache der Technik formuliert drei Hauptbestandteile, um eine **Bewegung** von Ort zu Ort (Fortbewegung) zu realisieren: Energiequelle, Energie-Bewegungswandler und Steuereinheit (Abb. 1.1).

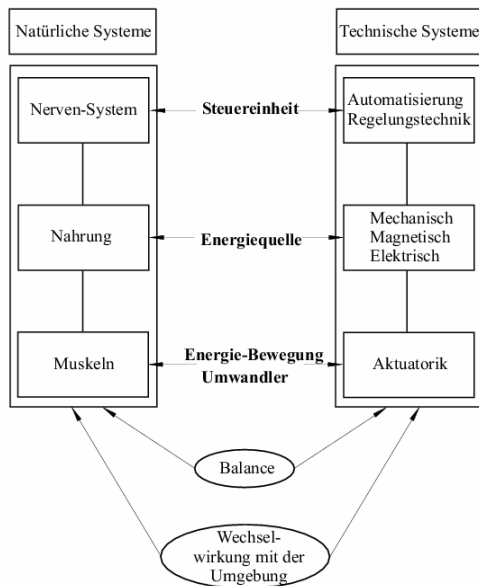


Abbildung 1.1: Bewegungssysteme in Natur und Technik.

Ein biologisches System entnimmt die erforderliche Energie der Nahrung. Das Nervensystem sendet Signale an die Muskeln, um den Energiewandlungsprozess einzuleiten und mit ihrer Hilfe über das Skelettsystem (Bewegungsapparat) die gewünschte Bewegung auszukoppeln. Das Phänomen „Fortbewegung“ ist gleichermaßen für Techniker und Vertreter der „life sciences“ von Interesse. Die **Bionik** als Wissenschaft, die interdisziplinär Fragestellungen aus beiden Gebieten betrachtet, widmet sich mittlerweile

mit einer Spezialrichtung, der **bionischen Robotik** (innerhalb der Konstruktionsbionik) den Fragestellungen der Bewegungserzeugung und -steuerung [Nachtigall97] (Abb. 1.2).

Dabei geht es längst nicht mehr um das bloße Nachahmen biologischer Lösungen mit technischen Mitteln. Für ein aktuelles, innovatives Fachgebiet, das aus der konvergenten Entwicklung der Bionik und der **Mechatronik** hervorgegangen ist, steht der international eingeführte Begriff **Biomechatronik**. Diese Wissenschaft steht für die Entwicklung und Verbesserung mechatronischer Systeme unter Nutzung von biologischem und medizinischem Wissen (kurz: Biologie und Medizin für Ingenieure).

Neben der Anwendung mechatronischer Systeme am menschlichen Organismus stehen im Mittelpunkt dieser Wissenschaft auch ihre Applikation in anderen lebenden Systemen (Organismen, Biotechnik-Anlagen, Umwelt) und insbesondere die Ableitung von Entwurfsideen für technische Systeme aus biologischen Vorbildern im Sinne der Bionik. Die Mechatronik, als vergleichsweise junge Wissenschaftsdisziplin, befindet sich selbst noch in der Phase der Erschließung ihrer Möglichkeiten und ist somit mehr als andere Technikgebiete offen für die Ideen aus bionischer Forschung. Bei den Lebewesen sind alle Elemente der Stoff-, Energie- und Informationswandlung wie beim mechatronischen System präsent, wenn auch ihre funktionstragenden Komponenten häufig schwer voneinander abgrenzbar sind. Biologische Systeme, vom Makromolekül bis zum Ökosystem, sind durch eine hohe Komplexität gekennzeichnet. Ihre Existenz wird gesichert durch Anpassung, Selbststabilisierung und Nachhaltigkeit in ihrer Wechselwirkung mit der Umgebung. Dies sind Prinzipien, die zunehmend auch in hochkomplexen technischen Systemen umzusetzen sind. Mit „smart materials“ für integrierte Energie- und Signalwandlungsfunktionen, „compliant mechanisms“ für stoffkohärente Kraft- und Bewegungsübertragung und „adaptronics“ als Kennzeichnung für den Entwurf anpassbarer „intelligenter“ technischer Systeme hat der technologische Erkenntnisfortschritt Lösungen hervorgebracht, die die Schnittmenge von Biologie und Technik im Allgemeinen und Bionik und Mechatronik im Speziellen immer deutlicher hervortreten lässt.

In der vorliegenden Arbeit werden biologische Beispiele nicht nachgebaut, sondern die aus ihrer Beobachtung abgeleiteten Gestaltungs- und Funktionsprinzipien mit den Möglichkeiten der Technik in „biologisch inspirierte“ Konstruktionen umgesetzt [Witte00]. Der Fokus der Untersuchungen liegt dabei auf dem Schwerpunkt der Bewegungserzeugung im Bereich der apedalen Lokomotion. Wenn Räder und Beine zum Einsatz kom-

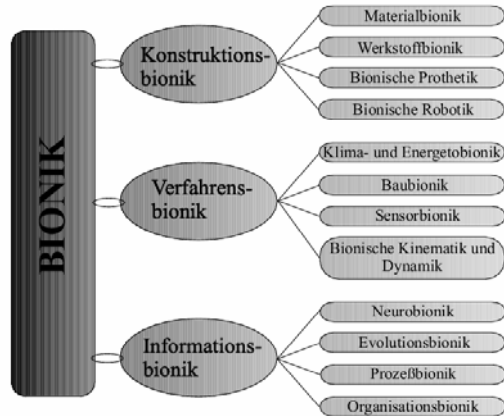


Abbildung 1.2: Bionik und ihre Teilgebiete nach [Nachtigall97].



men, dienen diese nicht vordergründig der Entwicklung neuer Laufmaschinen bzw. radgetriebenen Fahrzeugen.

Das natürliche bzw. technische System kann nicht ohne die Wechselwirkung mit seiner Umgebung beweglich sein und muss das Gleichgewicht halten, und zwar statisch und dynamisch.



## 2. Kapitel

### Aufgaben, Ziele und Aufbau der Arbeit

Ziel der Promotionsarbeit ist es, Untersuchungen an undulatorischen Lokomotionssystemen nach biologischem Vorbild vorzunehmen und Designvorschläge für die technische Realisierung zu erarbeiten. Schwerpunkte der Arbeit bilden theoretische und experimentelle Untersuchungen zu den beiden im Rahmen der Arbeit entwickelten Lokomotionssystemen „TM-ROBOT“ und „MINCH-ROBOT“ (Abb. 2.1).

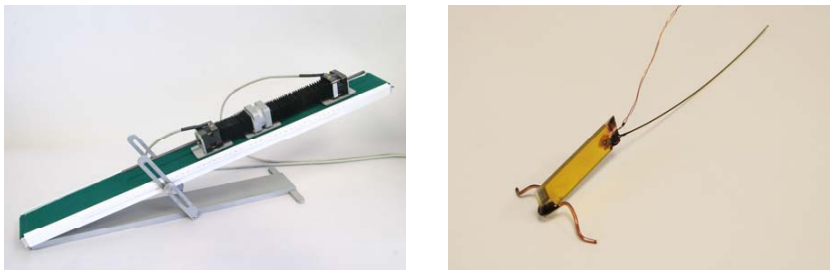


Abbildung 2.1: „TM-ROBOT“ (li.) und „MINCH-ROBOT“ (re.).

Damit setzen die Untersuchungen in dieser Arbeit kontinuierlich auf den Vorarbeiten von [Steigenberger04], [Zimmermann04a], [Steigenberger03a,b], [Huang03], [Steigenberger02] und [Kunz01] auf.

Im Vergleich zu den genannten Arbeiten sind die hier vorgestellten Forschungen eher experimentell ausgerichtet. So werden zum Beispiel

- bereits bekannte kinematische Steuerungen auf den neu entwickelten Prototyp TM-ROBOT angewandt,
- Materialpaarungen im Hinblick auf die Erzielung einer nichtsymmetrischen Reibung ausgewählt und der Reibungskoeffizient richtungsabhängig bestimmt, oder
- Lokomotionsgeschwindigkeiten mit bildverarbeitenden Systemen gemessen.

Mit dieser Zielsetzung verbindet sich auch der Inhalt des nachfolgenden Kapitels „Stand der Technik“. Es werden nur aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet mobiler Roboter basierend auf undulatorischer Lokomotion betrachtet.

Die in [Witte03] entworfene Klassifizierung von tierischen Bewegungssystemen (Abb. 2.2) bietet die Möglichkeit, die in dieser Arbeit verfolgten Entwicklungsrichtungen einzuordnen. Diese Klassifizierung kann allerdings die Kreativität der Technik nicht begrenzen. Ingenieure können beim Aufbau eines beweglichen Systems eine oder mehrere Bewegungseigenschaften von verschiedenen Tieren nutzen bzw. kombinieren und somit ein neues Bewegungsprinzip entwickeln.

In der Abbildung 2.2 sind die Gegenstände der Arbeit im Bereich der Lokomotion farblich hervorgehoben. Lediglich bei einer pedalen Lokomotion muss darauf verwiesen werden, dass nur ein Beinpaar ( $n=1$ , nicht zeitlig) im MINCH-ROBOT des Kapitels 6 verwendet wird. Dieses Beinpaar ist passiv eingesetzt, d.h. es wird keine „klassische“ Beinbewegung im eigentlichen Sinne realisiert.

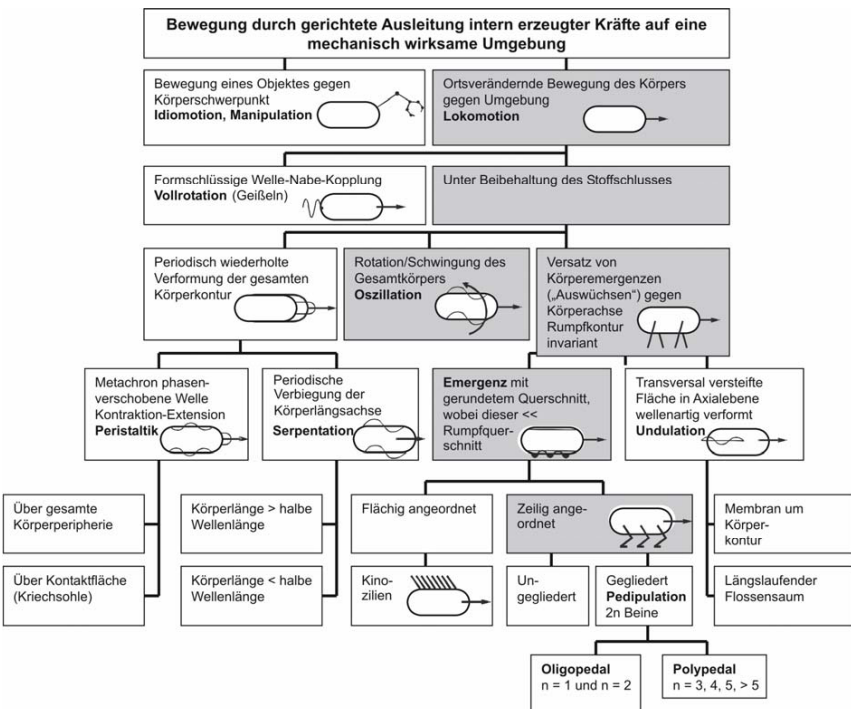


Abbildung 2.2: Systematik tierischer Bewegungsformen unter dem Aspekt bionischer Umsetzungsmöglichkeiten [Witte03].

---

## Aufbau der Arbeit

Nach einer Einleitung und einer Analyse des Standes der Technik wird im Kapitel 4 die Modellbildung allgemein und im Kontext der biologisch inspirierten Robotik betrachtet. Dabei wird ausführlicher und konkreter das Thema „Lokomotion“ von der Definition bis zu einem Maß für die Fortbewegung dargestellt.

Kapitel 5 ist dem TM-ROBOT gewidmet. Dort wird seine tatsächliche Bewegung bzw. die realen Werte der Geschwindigkeiten von den Massenpunkten des Roboters mit unterschiedlichen Bewegungsalgorithmen (engl.: „Gaits“) berechnet. Ein Teil dieses Kapitels ist für verschiedene Messungen (Weg der Massenpunkte, Reibkoeffizienten, maximaler Steigungswinkel) zuständig.

Kapitel 6 beginnt mit einer Vorstellung des Mikroroboters MINCH-ROBOT, danach wird ein analytisches Massenpunktsystem-Modell und ein Kontinuum seines Körpers mittels der FE-Methode präsentiert. Am Ende des Kapitels werden die Beinbewegungen des Roboters mit einer „High-Speed-Kamera“ aufgenommen und mittels des Softwarepakets „WINalyze<sup>1</sup>“ analysiert und schließlich einige Geschwindigkeitsmessungen bei verschiedenen Oberflächen durchgeführt.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick auf weiterführende Untersuchungen.

---

<sup>1</sup> Firma: „Mikromak Service Brinkmann“



# 3. Kapitel

## Stand der Technik

### 3.1 Allgemeine Grundlagen

Bewegungssysteme in der Technik sind **mechatronische Systeme**. Das Wort "mechatronics" wurde zuerst von TETSURO MORIA, einem Ingenieur der japanischen Firma Yaskawa, 1969 gebraucht. Unter „Mechatronik“ wird die synergetische Integration des Maschinenbauwesens („mecha“ für mechanics), der Elektronik („tronic“ für electronics), und der Informationstechnik verstanden. Solche Systeme werden mechatronische Systeme genannt, deren Elemente Sensoren, Aktuatoren, Mikrocontroller und Echtzeitsteuerungen in Verbindung mit einer Hardware zur Bewegungsrealisierung einschließen.

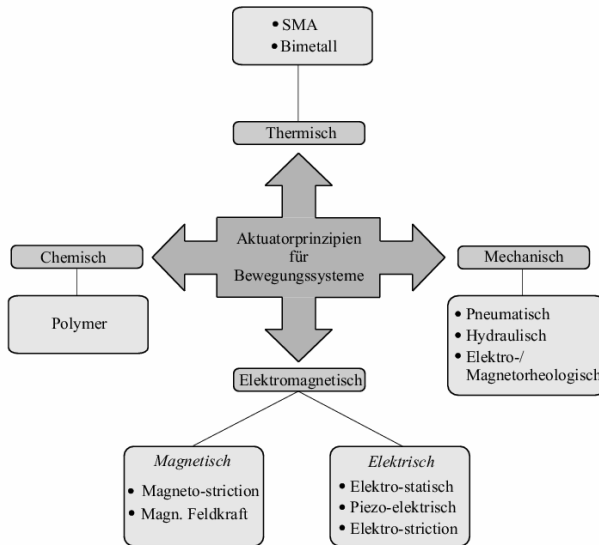


Abbildung 3.1: Aktuatorprinzipien bei Bewegungssystemen.

Aktuatoren spielen für Bewegungssysteme eine wesentliche Rolle. Die Aktorik ist ein Teil der Mechatronik, welcher die vielfältige Wirkprinzipien sowie deren technische Realisierung untersucht und entwickelt.

Abbildung 3.1 zeigt die wichtigsten Aktuatorprinzipien, die bei Bewegungssystemen benutzt werden [Brock94], [Ishihara96], [Fukuda99] und [Schilling99].

Jeder Aktuator-Typ besitzt spezielle Eigenschaften in Bezug auf Größe, Gewicht, Ausgangsleistung, Belastungsfähigkeit, Reaktionsgeschwindigkeit, Energieverbrauch sowie Eignung für bestimmte Einsatzgebiete [Huang03]. In [Schiessle02a,b] kann eine Beschreibung von Eigenschaften und Anwendungen der Aktuatoren in der Robotik gefunden werden.

### 3.2 Biologisch inspirierte Robotik mit dem Schwerpunkt undulatorischer Lokomotionssysteme

Wie schon in der Einleitung formuliert ist ein spezielles Fortbewegungsprinzip in seiner theoretischen Beschreibung und technischen Umsetzung Gegenstand dieser Arbeit – die undulatorische Lokomotion. Dabei soll an dieser Stelle sofort darauf hingewiesen werden, dass der Begriff „Undulation“ nicht im engen Sinne einer wellenförmigen Bewegung, wie in der Biologie üblich, gebraucht werden soll. Allgemeine biologische Beispiele der undulatorischen Bewegung sind Würmer, Schlangen, Amöben und Fische (Abb. 3.2).

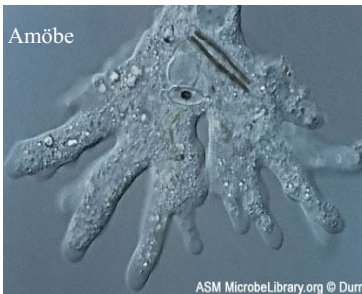


Abbildung 3.2: Undulation in der Natur.



Vielmehr soll unter Undulation im Sinne der Mechanik folgendes verstanden werden: eine Bewegung mittels Erregung der Aktuatoren des Systems. Diese Erregung kann sowohl von außen wirken, oder sie kann endogen sein, also im Inneren erzeugt werden. Der Aktuator erzeugt seinerseits eine in der Regel periodische Gestaltsänderung, welche durch die Wechselwirkung mit der Umgebung eine globale Lageänderung erzeugt, [Murray94] [Steigenberger04].

Diese Definition assoziiert als biologisches Vorbild sicherlich zunächst vorrangig kriechende Systeme (Wurm), bleibt aber in ihrer Allgemeinheit nicht auf derartige Lokomotionssysteme beschränkt. Diese Bewegungsform ist für mögliche Applikationen von Robotern zur Untersuchung des menschlichen Körpers, im Mikrobereich oder zukünftig im Nanobereich, sehr effizient.

Die Biologie definiert die undulatorische Bewegung als den allgemeinsten Typ der Lokomotion der Tiere. Solche Bewegung wird erreicht durch eine längsgerichtete Querwelle, die entlang des Körpers wandert [Gray68]. Es existieren Vertreter der Biologie, die undulatorische Lokomotion nur als Bewegung von Schlangen verstehen. In Veröffentlichungen, wie z.B. [Gray68], werden die Schlangenzugbewegungen in vier Hauptformen eingeteilt (Abb. 3.3):

- *Serpentine* movement,
- *Rectilinear* movement,
- *Concertina* movement,
- *Sidewinding* movement.

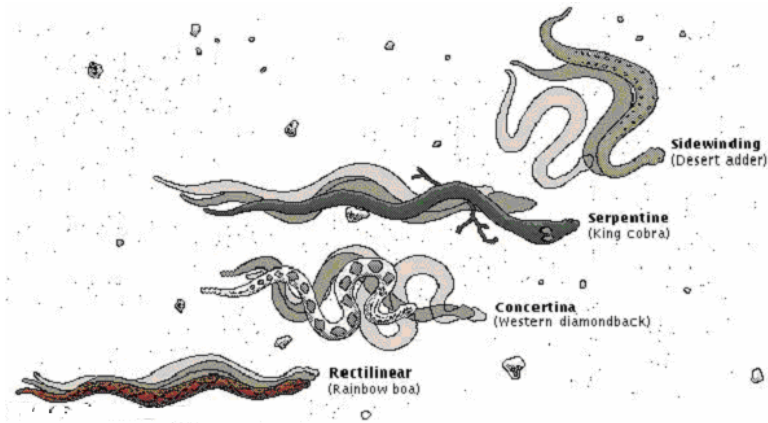


Abbildung 3.3: Die vier Hauptbewegungsformen der Schlangen<sup>1</sup>.

Neue Veröffentlichungen, wie z.B. [Dowling97] und [Worst98], definieren neben den o.g. Bewegungsformen eine fünfte Form: *Slide-pushing* movement.

<sup>1</sup> MS Encarta 97 Encyclopedia.

Schlangen mit ihren verschiedenen undulatorischen Bewegungsformen bilden Vorbilder für biologisch inspirierte Bewegungssysteme in Bezug auf Körperformen und Steuerungsmechanismen. Roboter auf der Basis undulatorischer Bewegung können wie folgt in zwei Klassen eingeteilt werden:

Klasse 1: Roboter, deren Elemente **selbst** mit angetriebenen Rädern oder Ketten versehen sind, und

Klasse 2: Roboter mit Aktuatoren zur Momenteneinleitung **an den Koppelstellen** kaskadierter Segmente.

Der Pionier in der Übertragung von Bewegungsformen in die Technik war der japanische Professor SHIGEO HIROSE. Anfang der 70er Jahre hatte er seinen ersten schlangenartigen Roboter (Active Cord Mechanism-ACM) vorgestellt [Hirose76]. Eine Weiterentwicklung war der ACM III [Hirose93] (Abb. 3.4).

Diesem 2D-Bewegungssystem mit Servoantrieben folgten undulatorische Lokomotionssysteme für unterschiedliche Anwendungen auch für den 3D-Bereich Roboter ACM-R3 mit 20 Segmenten, [Hirose01a] (Abb. 3.5).

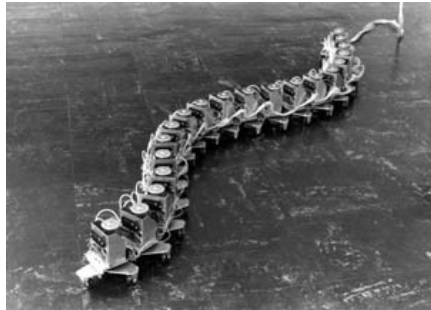


Abbildung 3.4: ACM III (HIROSE).



Abbildung 3.5: ACM-R3 (li.) und Souryu-II. (re.), (HIROSE).

#### **Bemerkung :**

Nach diesem kurzen Verweis auf die Historie werden nachfolgend nur neuere Arbeiten (nach 1990) bewertet und eingeordnet. Die Auswahl erfolgte vorrangig nach den Kriterien

- Anwendung neuer mechanischer Prinziplösungen,
- Originalität der biologischen Inspiration,
- Applikationsfelder.

Der Versuch einer vollständigen Erfassung von undulatorisch bewegten Robotern (ähnlich dem Laufmaschinen-Katalog von BERNS, [Berns00]) bleibt nachfolgenden Arbeiten vorbehalten.

Von HIROSE entwickelt wurde auch das System Souryu-II [Hirose01b]. Souryu-II besitzt 3 kaskadierte Segmente. Der Roboter ist mit CCD Kamera und Mikrophon zum Auffinden von verschütteten Personen ausgerüstet.

Den Arbeiten von HIROSE folgten zahlreiche undulatorische Lokomotionssysteme, die für verschiedene Aufgaben entwickelt wurden.

KLAASSEN/PAAP [Klaassen99] entwickelten den Roboter Snake2, der sechs aktive Segmente und einen Kopf besitzt. Jedes Segment besitzt 12 Antriebsräder, die gleichverteilt peripher angeordnet sind.

Ähnlich wie bei KLAASSEN ist der Abwasserkanal-Kontrollroboter, der von SCHOLL [Scholl00] (Abb. 3.6) am Forschungszentrum Informatik (FZI) in Karlsruhe entwickelt wurde, aufgebaut. Bei ihm hat jedes Segment zwei Räder. Der Antrieb erfolgt durch Momenteneinleitung an den Koppelstellen.

Abbildung 3.7 zeigt einen schlangenartigen Roboter S5 [Miller02]. Dieser Roboter bewegt sich, mit Blick auf die Anwendung im Entertainment- und Filmbereich sehr realistisch per Serpantation.

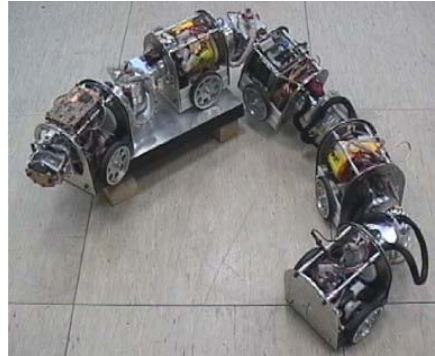


Abbildung 3.6: Abwasserkanalkontrollroboter (Scholl).

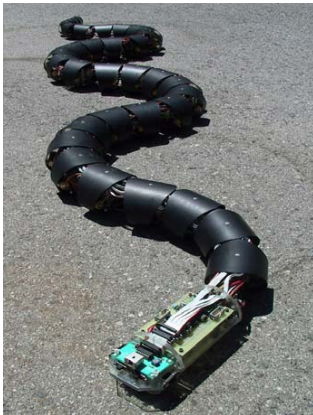


Abbildung 3.7: System S5 nach MILLER.



Abbildung 3.8: OmniTread (GRANOSIK).

OmniTread (Abb. 3.8) ist die Bezeichnung für einen Roboter auf der Basis der Serpensation, der für Inspektionsmissionen bestimmt ist. Er besteht aus fünf Segmenten, die miteinander durch Gelenke mit dem Freiheitsgrad 2 verbunden sind. Der Antrieb erfolgt über Ketten auf allen vier Seiten jedes Segments. Dies sichert eine hohe Mobilität auch in komplizierten Terrains, ist aber mechanisch weniger interessant, [Granosik05].

Eine neue Klasse von Robotern (engl.: „amphibious robots“) zeichnet sich durch die Fähigkeit sowohl zur terrestrischen als auch aquatischen Lokomotion aus. Davon existieren einige Prototypen, unter anderem Reel II von MCISAAC und OSTROWSKI [Mcsaac99], The Lamprey Robot von WILBUR et al. [Wilbur02], Helix-I von HIROSE [Hirose02] und der AmphiBot-I Roboter von CRESPI et al. [Crespi05a,b].

Helix-I ist praktisch ein 3D-Active Cord Mechanism, der sich auf dem Boden und im Wasser bewegen kann (Abb. 3.9 (li.)). Die biologische Inspiration basiert auf Bewegungsstudien eines Mikroorganismus (Spirochete).

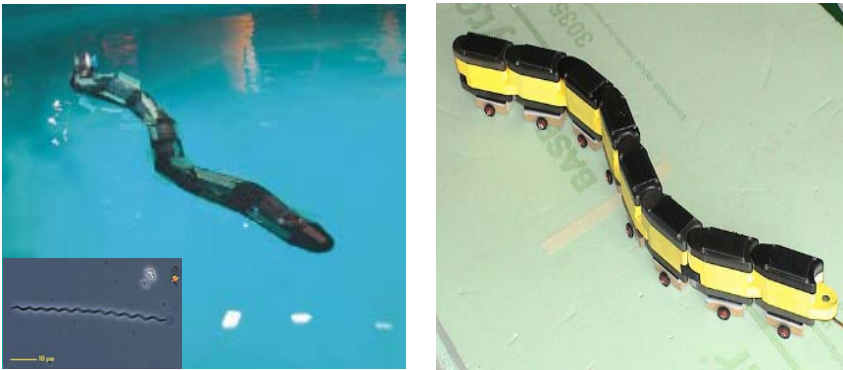


Abbildung 3.9: Helix-I von HIROSE et al. (li.) und AmphiBot-I von CRESPI et al. (re.).

Das System 2, den AmphiBot-I Roboter von CRESPI, zeigt Abbildung 3.9 (re.). Seine Segmente können mit passiven Rädern ausgestattet werden.

Neben diesen vorrangig durch die Serpensation inspirierten Systemen bilden die Systeme auf der Basis der Peristaltik eine weitere Gruppe biologisch inspirierter Lokomotionssysteme.

BÖGELSACK/SCHILLING [Bögelsack02] haben die peristaltische Bewegung als wellenartig fortschreitende Bewegungsform definiert. Bei WESTHEIDE findet man eine biologische Beschreibung der peristaltischen Bewegung des Regenwurms. „Bei einem Regenwurm in der Ruhestellung sind die Borsten ausgestreckt, und die Längs- und Ringmuskulatur ist entspannt. Zur Fortbewegung kontrahiert sich zunächst die Ringmuskulatur. Dabei streckt sich das jeweilige Segment, die Borsten sind eingezogen, und die Längsmuskulatur ist entspannt. Hinter diesem Segment zieht sich der Regenwurm zusammen. Dieser Teil bleibt stationär und richtet die Borsten auf, die Längsmuskeln sind angespannt und die Ringmuskeln entspannt. Mit den jetzt nach außen gespreizten Borsten dient das Segment als Widerlager. Die Region mit kontrahierender Ring- und die Bereiche mit kontrahierender Längsmuskulatur laufen in peristaltischen Wellen von vorn nach hinten“ [Westheide96].

Das Prinzip und die Dynamik der peristaltischen Bewegung des Regenwurms ist von PETERS/WALLDORF untersucht worden [Peters86]. QUILLIN ermittelt einen Zusammenhang zwischen der Größe des Regenwurmes und seiner Bewegungsgeschwindigkeit (Abb. 3.10) [Quillin99].

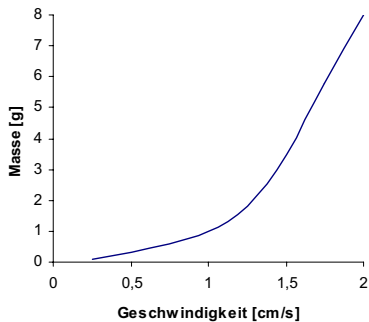


Abbildung 3.10: Abhängigkeit Masse-Geschwindigkeit bei der Peristaltik des Regenwurms [Quillin99].

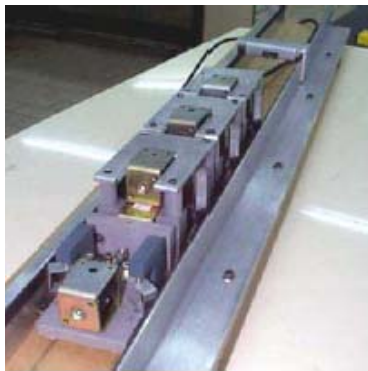


Abbildung 3.11: Inchworm Robot nach YEO.

Bei immer gleichen peristaltischen Bewegungen basieren die realisierten Prototypen auf einer unterschiedlichen Aktuatorik. YEO nutzt für sein System Pneumatikzylinder [Yeo00] (Abb. 3.11).

Einen Prototypen, dessen Fortbewegung durch Wanderwellen, die sich durch den Roboter in Bewegungsrichtung (Schwanz → Kopf) ausbreiten, entwickelte GONZALES [González04] (Abb. 3.12).

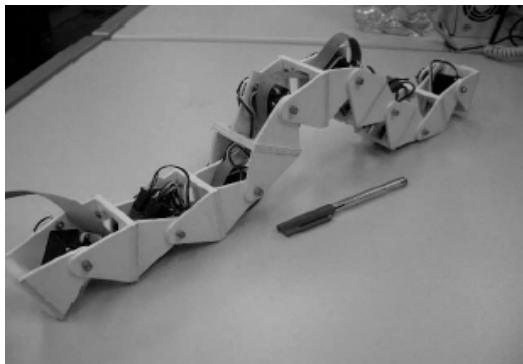


Abbildung 3.12: Wurmartiger Roboter Cube nach GONZALES.

Roboter, die auf der peristaltischen Bewegung des Regenwurmes basieren, sind vor allem für Anwendungen in der Medizin (Endoskopie und Colonoskopie) entwickelt worden. Beispiele hierzu sind die Systeme von CHIEL [Chiel02] (Abb. 3.13) und SLATKIN [Slatkin95] (Abb. 3.14).

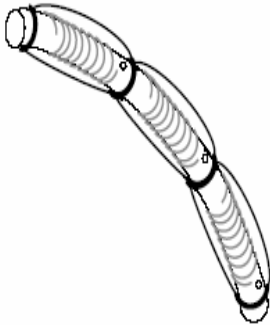


Abbildung 3.13: Endoskope von CHIEL.

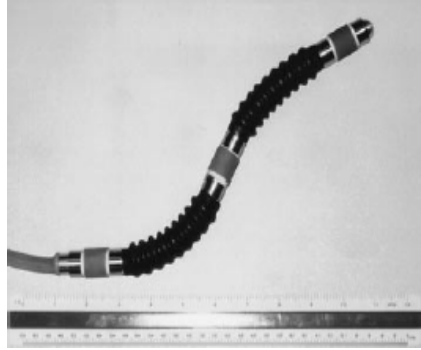


Abbildung 3.14: Endoskope von SLATKIN.

Das Lokomotionssystem von HONG, der Whole Skin Locomotion Mechanism (WSL), basiert auf dem Fortbewegungsprinzip der Amöben [Hong05]. Der Roboter besitzt eine elastische Membran als äußere Haut. Der Roboter kann seine Dimension jeweiligen Hindernissen anpassen. So zum Beispiel kriecht er durch Öffnungen, deren Durchmesser kleiner sind als seine nominale Breite (Abb. 3.15).



Abbildung 3.15: WSL-Mechanismus (HONG).

Mikroroboter kleiner, schneller, robuster, zuverlässiger zu konstruieren und gleichzeitig ihre Kosten zu reduzieren, ist heute eine der Haupttendenzen der Technik.

MARTEL et al. [Martel01] haben einen Mikroroboter (Nano-Walker) mit drei Piezo-Beinen entworfen, der verschiedene Arten von Instrumenten, Sensoren und Nano-Manipulators tragen kann (Abb.3.16).

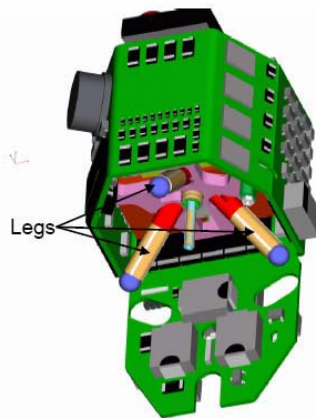


Abbildung 3.16: Diagramm, welches die drei Piezobeine des Nano-Walker zeigt (MARTEL).

Zahlreiche Mikroroboter, die Piezoaktuatoren nutzen, sind an der Universität von Vanderbilt (Nashville, USA) entwickelt worden, Darunter die Prototypen GF6 und MG3 [Lobontiu98] (Abb. 3.17).

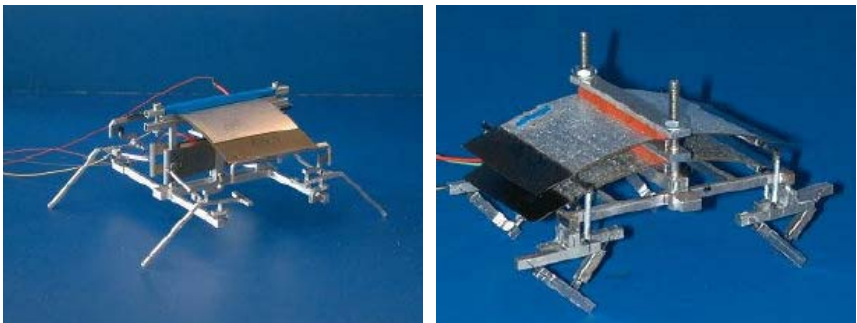


Abbildung 3.17: : GF6 und MG3 nach [Lobontiu98].



GF6 nutzt einen Piezoaktuator, hat vier Beine und kann die Geschwindigkeit von 15 cm/Sek. erreichen. MG3 hat auch vier Beine, aber im Vergleich zu GF6 nutzt er zwei Piezoaktuatoren und ist schneller (bis zu 30 cm/Sek.).

An der Technischen Universität Ilmenau ist der Prototyp von WEISE [Weise02] realisiert worden (Abb. 3.18).

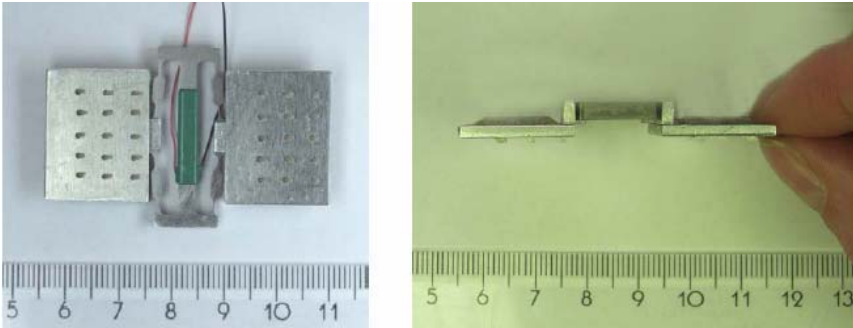


Abbildung 3.18: Der Mikroroboter von WEISE [Weise02].

Der Mikroroboter von WEISE besitzt nur einen Piezoaktuator und nutzt für die Bewegung nichtsymmetrische Reibkräfte, die durch seine Faserbündel-Borstenstruktur realisiert sind.

Eine neue, aus mechanischer und steuerungstechnischer Sicht interessante Klasse von Lokomotionssystemen bilden die sich selbst konfigurierenden Roboter (engl.: „self reconfigurable robots“).

Als biologisches Vorbild wird nach Literaturangaben der Schleimpilz (Abb. 3.19) angesehen. Ein self-reconfigurable robot ist eine Maschine, die aus einigen Atommodulen besteht.

Sie kann die Funktionalität der gesamten Maschine oder des Organismus ändern, indem sie die Positionen der Atommodule in Bezug aufeinander neu ordnet.

Beispiele für derartige Roboter sind die Systeme Atron [Jorgensen04] und M-Tran II [Kamimura04] (Abb. 3.20).

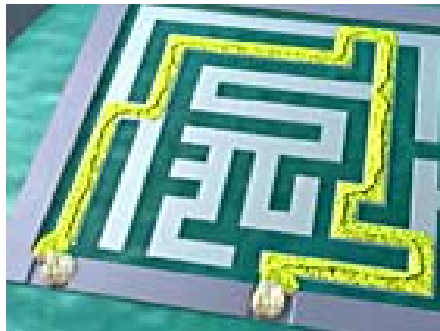


Abbildung 3.19 Schleimpilz im Experiment.



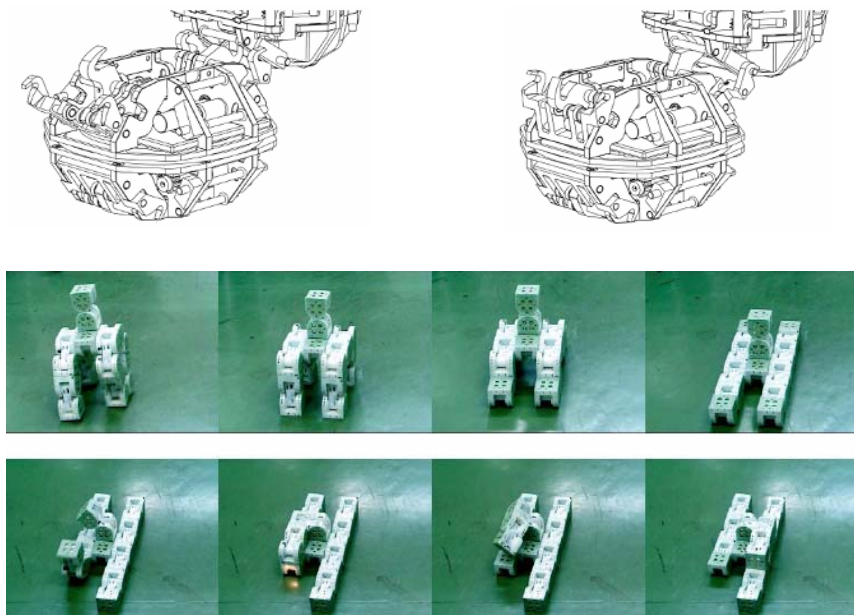


Abbildung 3.20: Oben: Atron bei der Kontaktierung (JORGENSEN).  
 Unten: M-Tran II bei seiner Formänderung (KAMIMURA).

In der Literatur sind einige Quellen mit einer neuen Idee undulatorischer Lokomotionssysteme zu finden. Diese Idee ist die Nutzung magnetischer Komponenten, um eine Wanderwelle zu realisieren und somit periodische Verformungen des Systemkörpers zu generieren [Zimmermann04b,c,d] und [Kunz00] (Abb. 3.21).



Abbildung 3.21: Beispiele für wurmartige Lokomotionssysteme auf Basis magnetischer Polymere.

Auch für die Regelungsmethoden undulatorischer Lokomotionssysteme sind zahlreiche Literaturquellen zu finden, z.B. [Behn05] und [Ma01] für die „trajectory-tracking control“ Methode, [Matsuno03] und [Ostrowski96] für die kinematische „online Gait-generating control“ Methode und [Ute02] und [Date01] für die dynamische „online Gait-generating control“ Methode.

### ***Vor- und Nachteile undulatorischer Bewegungssysteme***

In einer zusammenfassenden Wertung können Vor- und Nachteile undulatorischer Bewegungssysteme im Vergleich zu Robotern mit Rädern oder Beinen wie folgt genannt werden (siehe et al. [Huang03], [Fernworn95], [Walton90] und [Nakamura91]).

#### **Stabilität**

Der Schwerpunkt bei undulatorischen Bewegungssystemen liegt üblicherweise niedriger als bei den radgetriebenen Systemen oder Laufmaschinen, was Vorteile in Bezug auf die statische und dynamische Stabilität bietet.

#### **Erforderliche Energie und Effizienz**

Ein undulatorisches Bewegungssystem benötigt weniger Energie im Vergleich zu Robotern mit Rädern und Beinen, weil eine Beschleunigung zusätzlicher, nur für die Bewegung erforderlicher Baugruppen (damit Trägheiten) weitestgehend entfällt.

#### **Steuerung**

Undulatorische Bewegungssysteme erfordern meist einen erhöhten Steueraufwand, weil sie häufig aus kaskadiert angeordneten Einzelelementen bestehen, die individuell angesteuert werden müssen. Das Gleiche gilt für Laufmaschinen, die getrennte Steuerungen für die Beine benötigen. I.a. sind am „einfachsten“ radgetriebene Roboter zu steuern, da diese Systeme im mechanischen Freiheitsgrad niedriger liegen.

#### **Redundanz**

Eine Erhöhung der Zahl von (eher einfach strukturierten) Elementen bei undulatorisch bewegten Robotern ermöglicht dem System bei Ausfall von Teilen „weiterzufunktionieren“.

#### **Design**

Das technische Ziel lautet, undulatorische Bewegungssysteme (wurm- oder schlangenartig), als „compliant mechanisms“, d.h. als stoffkohärente nachgiebige Mechanismen, zu realisieren.

Diese Eigenschaft ist vorteilhaft für Geräte, die in unbekanntem oder gefährlichem Umgebungen eingesetzt werden sollen. Ein Mikroroboter mit wurmartigem Bewegungssystem kann in einem kleineren Querschnitt als ein Roboter mit einem „wheeled“ oder „legged“ Bewegungssystem aktiv werden.

### **Überwinden von Hindernissen**

Bevorzugt im Einsatz für komplizierte Terrains sind Laufmaschinen bzw. mehrrädrige Fahrzeuge, mit unabhängig voneinander ansteuerbaren und ausrichtbaren Achsen. Undulatorisch bewegte Systeme sind für das Überwinden von Hindernissen ebenfalls gut geeignet, da sie einen flexiblen Körper besitzen, der mit dem Boden (und damit auch dem Hindernis) bei der Bewegung in Kontakt bleiben kann (siehe auch *Stabilität*).

### **Geschwindigkeit**

Roboter mit Beinen und Rädern haben i.a. Geschwindigkeitsvorteile.

Bemerkung: Mit dem im Kapitel 6 vorgestellten System auf Basis hochfrequenter Schwingungen wird allerdings auch ein sehr schnelles undulatorisches Bewegungssystem vorgestellt.

### ***Anwendungsgebiete undulatorischer Bewegungssysteme***

Aus dem oben genannten Vergleich heraus ergeben sich die aktuellen oder potenziell machbar erscheinenden Applikationsfelder für undulatorische Bewegungssysteme:

- Informationsgewinnung in den für den Menschen unerreichbaren oder schwer zugänglichen Gebieten (Inspektions- und Expeditionsmissionen) [Wilcox04], [Hertzberg99], [Moraleda99] und [Lee94],
- Einsatz in gefährlichen Umgebungen (Minenbeseitigung, Erdbebengebiete) [Fatikow97] und [Siegwart95],
- Medizin (minimal-invasive Chirurgie und Endoskopie) [Couvillon06], [Tartaglia06], [Belson05], [Hoeg00] und [Dario99].



## 4. Kapitel

# Mathematisch-mechanische Grundlagen für wurmartige Lokomotionssysteme

### 4.1 Modellbildung

#### 4.1.1 Allgemeine Betrachtungen

Am Beginn dieses Kapitels stehen einige Bemerkungen zum Prinzip der Modellbildung. Ganz allgemein liege ein in unserem Fall biologisches, technisches oder auch virtuelles Objekt vor. Es soll untersucht werden, welche Eigenschaften das Objekt hat, wie und warum es sich bewegen kann usw. Dazu wird das Objekt auf ein **physikalisches Modell** abgebildet. Das geschieht durch Abstraktion, indem Eigenschaften des Objektes, die „vermutlich“ für die Untersuchungszwecke nicht relevant sind, nicht betrachtet werden. Zum Beispiel wird bei Objekten, deren Fortbewegung betrachtet werden soll, die Farbe nicht interessieren. Auch thermodynamische Eigenschaften können in der Betrachtung entfallen, wenn es nur um die Kinematik des Objektes geht. Sie müssten aber z.B. für die Untersuchung der Stoffwechselfvorgänge oder des Energietransfers im Objekt mit modelliert werden. Was im Abstraktionsprozess entfällt, hängt

- maßgeblich vom verfolgten Untersuchungsziel,
  - von den Kenntnissen, welche man vom Objekt besitzt, und (oft vergessen)
  - von den mathematisch-mechanischen Fähigkeiten, die man besitzt,
- ab.

Für jedes physikalische Modell sollte gelten: „Es muss so einfach wie möglich sein und so kompliziert wie nötig“. Wenn das Modell vorliegt, muss die physikalische Theorie zur Anwendung kommen, die für die Prozesse „zuständig“ ist, d.h. Mechanik, Elektrotechnik, Thermodynamik usw. Besteht nicht die Möglichkeit, eine Gesamtheorie auf das Modell anzuwenden, dann müssen in der Regel klar formulierte Arbeitshypothesen aufgestellt werden. Dies führt zu einem **mathematischen Modell**, welches in der Regel als ein System von Gleichungen oder als ein System von Differentialgleichungen auftreten wird.

Darauf werden mathematische Methoden angewendet, d.h. es wird eine mathematische Analyse durchgeführt, und man gelangt zu gewissen Aussagen über das Modell. Parameter im Modell können zunächst meist geeignet fixiert werden, und man gelangt somit zu einem realen oder auch virtuellen Prototypen. Mit diesem Prototypen wiederum werden ebenfalls reale oder mathematische Experimente durchgeführt. Mit den erhaltenen Messergebnissen sind die mathematischen Aussagen mit den experimentellen Ergebnissen zu Vergleichen. Danach muss das physikalische Modell möglicherweise abgeändert werden, und es folgt eine Iteration, bis das Untersuchungsziel (der Prototyp besitzt die gewünschten Eigenschaften) erreicht wird. Das ist der allgemeine Prozess einer Modellbildung, wie gestaltet sich dieser Prozess beim Wurm?

### 4.1.2 Physikalisches Modell des Wurms

**Definition:** Ein wurmartiges Lokomotionssystem ist ein terrestrisches Lokomotionssystem mit einer dominanten linearen Dimension ohne aktive, d.h. treibende, Beine oder Räder; kurz „Wurm“ [Steigenberger04].

Es wird nachfolgend nicht vordergründig zwischen einem biologischen Objekt oder einem technischen Objekt unterschieden, d.h. biologischer Wurm und künstlicher Wurm sind „gleich“. Zunächst wird nur der gerade Wurm betrachtet, der sich längs einer Geraden bewegt. Räder dürfen bei einem technischen Gebilde angebracht sein, aber sie sind passiv und nur zur Reibungsherabsetzung oder ähnlichem vorhanden. Als Paradigma kann etwa der Regenwurm angesehen werden.

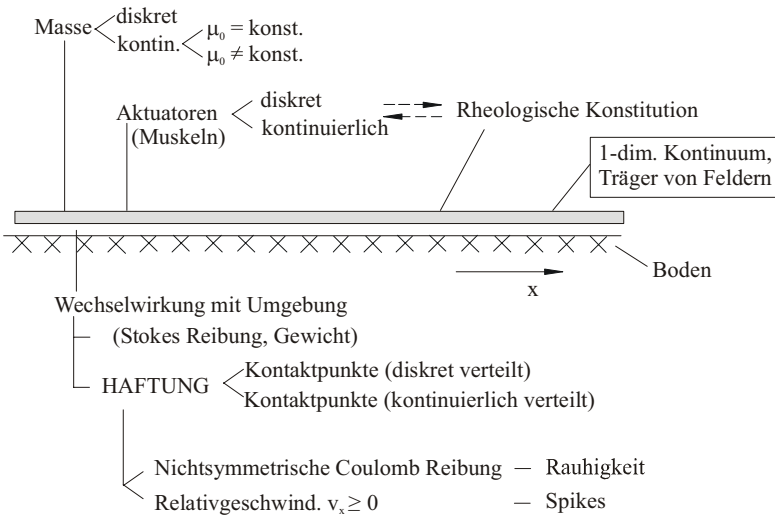


Abbildung 4.1: Physikalisches Modell des Wurms.

Der Wurm sollte lang und dünn sein, er wird als ein eindimensionales Kontinuum modelliert (anschaulich: ein fadenförmiges Gebilde von endlicher Länge). Dieses Kontinuum (Intervall einer körperfesten Koordinate) ist der Träger von verschiedenen Feldern (Abb. 4.1) [Steigenberger04].

Das **Feld 1** ist vor allem mit Blick auf dynamische Untersuchungen die Masse. Sie ist diskret verteilt, d.h. es wird ein System von Massenpunkten betrachtet, oder die Masse ist kontinuierlich verteilt, mit einer konstanten oder einer nichtkonstanten Massendichte (Masse pro Längeneinheit).

Das **Feld 2** ist ein Feld von Aktuatoren, welche diskret oder kontinuierlich verteilt sein können. Möglicherweise steht dies im Zusammenhang mit der rheologischen Konstitution des Materials, aus dem der Wurm gefertigt wurde.

Ein Aktuator kann zunächst als einen Multipol verstanden werden. Je nachdem wie weit man ihn selbst mit modellieren oder gar nicht modellieren wird, tritt er als Blackbox (z.B. Input: elektrische Spannung, Output: Kraft/Moment) auf oder im anderen Fall werden die Energiewandlungsprozesse vollständig mit beschrieben.

Fall A: die Aktuatordynamik wird mit modelliert, oder

Fall B: die Aktuatordynamik wird nicht mit modelliert.

Im Fall B müssen dem Modell weitere Arbeitshypothesen hinzugefügt werden. Daneben benötigt das System Energie, die intern vorhanden sein könnte (Batterie) oder von außen zugeführt wird. Damit liefert der Aktuator einen Output, der nachfolgend an einem Beispiel konkretisiert wird. Im Fall des Prototyps in Abbildung 4.2 ist der Output eine Kraft.

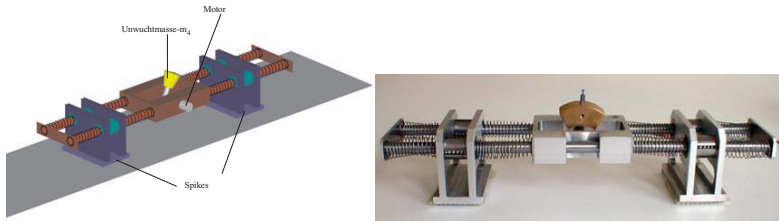


Abbildung 4.2: Lokomotionssystem mit Unwuchtantrieb mit Prinzipbild (li.) und als reales System (re.) [Huang03].

Ein physikalisches Modell, welches dem Fall A zuzuordnen ist, berücksichtigt den Unwuchtantrieb. Ein Modell mit 4 Massenpunkten, wovon nur die beiden äußeren Bodenkontakte haben, zeigt Abbildung 4.3 (li.).

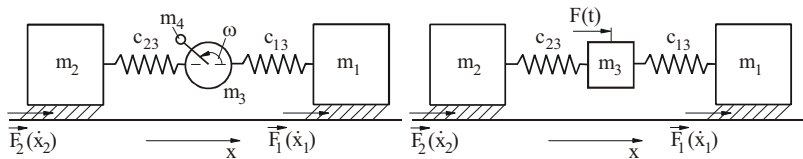


Abbildung 4.3: Modelle des Prototyps im Fall A (li.) und Fall B (re.).

Die Gleichungen des mathematischen Modells lauten in diesem Fall ( $m_4 \ll m_3$ )

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -c_{13}(x_1 - x_3) + F_1(\dot{x}_1) \\ m_2 \ddot{x}_2 &= c_{23}(x_3 - x_2) + F_2(\dot{x}_2) \\ m_3 \ddot{x}_3 &= \omega^2 R_k m_4 \cos \omega t + c_{13}(x_1 - x_3) - c_{23}(x_3 - x_2) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Im anderen Fall B wird das gleiche System nur durch eine auf die Masse  $m_3$  wirkende periodische Kraft (woher auch immer kommend) bewegt.

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -c_{13}(x_1 - x_3) + F_1(\dot{x}_1) \\ m_2 \ddot{x}_2 &= c_{23}(x_3 - x_2) + F_2(\dot{x}_2) \\ m_3 \ddot{x}_3 &= \hat{F} \cos \omega t + c_{13}(x_1 - x_3) - c_{23}(x_3 - x_2) \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

Ein nächster wichtiger Aspekt der Modellbildung betrifft die Wechselwirkung mit der Umgebung. Der Wurm soll ein terrestrisches System sein, d.h. es befindet sich in der Nachbarschaft von einem Medium, welches man den Boden nennt. Es muss keine Ebene, sondern es könnte auch ein Rohr sein, in dem sich der Wurm befindet, allseitiger Kontakt zur Umgebung ist möglich.

Mit dem Boden oder allgemein mit der Umgebung findet eine Wechselwirkung statt, die in das Modell integriert werden muss.

Beispiel 1: Der Wurm befindet sich in einem Rohr, das z.B. mit Öl gefüllt ist. Dann ist die Berücksichtigung von STOKESscher Reibung im Modell erforderlich.

Beispiel 2: Ist der Wurm in Bodennähe wird das Gewicht zu berücksichtigen sein, da es über die Normalkraft in die COULOMBSche Reibung eingeht.

Besonders interessant für die Lokomotion ist die Haftung. Die Haftung wird in bestimmten Punkten zwischen Wurm und Boden realisiert. Diese Kontaktpunkte können längs des Wurmes ebenfalls diskret oder kontinuierlich verteilt sein.

Die Beschreibung der Haftung kann zum einen durch nichtsymmetrische COULOMBSche Reibung erfolgen. Nichtsymmetrie soll heißen, sie ist richtungsabhängig: in der Vorwärtsrichtung existiert eine kleine, rückwärts eine große Reibung. Das wird ermöglicht durch die Rauheit oder der Textur dieser Oberflächen. Oder man kann zum anderen „verlangen“, dass in den Kontaktpunkten Borsten oder



Abbildung 4.3: „Spikes“ am Regenwurm.

ähnliches vorhanden sind, die dafür sorgen, dass sich der Kontaktpunkt relativ zum Boden nur in einer Richtung bewegen kann. Die Geschwindigkeitskomponente in



x-Richtung kann dann nicht negativ sein. Im folgenden wird der Begriff „Spikes“ verwendet.

Ein Blick auf den realen Regenwurm zeigt die Existenz derartiger Borsten am biologischen Vorbild (Abb.4.4) [Till90].

### 4.1.3 Mathematisches Modell des Wurms

Wie gelangt man mit den in den vorangegangenen beiden Abschnitten gemachten Aussagen über die allgemeine Modellbildung und physikalische Effekte im Zusammenhang mit der Wurmbewegung zu konkreten Modellen, die einer mathematischen Untersuchung zugänglich sind?

Es wird ein System von Massenpunkten betrachtet, die von 0 bis  $n$  numeriert werden. Die Nummer 0 bezeichnet den Kopf. Das System liegt auf einer Geraden, welche mit der  $x$ -Achse identifiziert wird. Die Koordinaten der Massenpunkte sind  $x_0, x_1$  bis  $x_n$ , (siehe Abb. 4.5).

Diskretes Modell:  $n \geq 2$

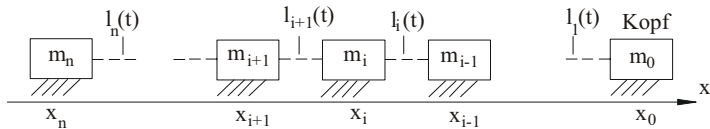


Abbildung 4.4: Diskretes Wurmmodell.

Zwischen je 2 benachbarten Massenpunkten liegt ein Aktuator, der den Abstand  $l_i(t)$  zwischen den beiden benachbarten Massenpunkten einstellt. Der Output des Aktuators ist somit eine Verschiebung (oder Geschwindigkeit), d.h. der Abstand  $l_i(t)$  dieser beiden Massenpunkte (oder der Geschwindigkeit zwischen diesen beiden Punkten) ist eine gegebene Funktion der Zeit. Bezugnehmend auf die Klassifizierung in Abschnitt 4.1.2 handelt es sich um den Fall B, da keine konkrete Erregung modelliert wird.

**Bemerkung:** In der Steuerungstheorie ist es üblich, dass solche kinematischen Größen (Abstände oder Winkel als Funktion von der Zeit  $t$ ) als Steuerungen vorgegeben werden. Auf den realen Wurm übertragen kann man sagen, dass es gleichfalls nicht bekannt ist, ob er bei seiner Steuerung an „die Kraft oder an den notwendigen Weg denkt ...“

Somit folgt eine erste, geometrische und rheonome Zwangsbedingung

$$x_{i-1} - x_i - l_i(t) = 0 \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4.3)$$

Damit folgt für die Lage des  $i$ -ten Massenpunktes

$$x_i = x_0 - L_i(t) \quad , \quad L_i(t) := \sum_{j=1}^i l_j(t) \quad , \quad i = 0, 1, \dots, n. \quad (4.4)$$

was zugleich verdeutlicht, dass der Freiheitsgrad des Systems 1 ist. Mit der Angabe der Kopfkoordinate ist die Lage eindeutig bestimmt.

Jeder Massenpunkt trägt die schon angeführten Spikes, die eine Bewegung der einzelnen Massenpunkte in negative  $x$ -Richtung verhindern. Das führt zu einer zweiten, kinematischen Zwangsbedingung in Form einer Ungleichung

$$\dot{x}_i(t) \geq 0 \quad , \quad i = 0, 1, \dots, n \quad , \quad \forall t. \tag{4.5}$$

In [Steigenberger04] ist für derartige Wurm-Modelle die folgende Kinematik und Dynamik entwickelt und untersucht worden.

Nach Einführung der Größen

$$S_i = x_0 - x_i \quad \text{mit} \quad \dot{S}_i \leq \dot{x}_0 \quad , \quad \forall i \tag{4.6}$$

und

$$V_0 := \max \{ \dot{S}_i , i = 0, 1, \dots, n \} \tag{4.7}$$

ist die Kinematik durch die Gleichung

$$\dot{x}_0 = V_0 + w \quad ,$$

mit  $w \geq 0$ , beschrieben.  $w$  ist der (im Rahmen der Kinematik unbestimmt bleibende) „Starrkörperanteil“ der Geschwindigkeit.

Die Dynamik des Systems folgt aus dem Impulssatz für jeden Massenpunkt

$$m\ddot{x}_i = G_i + F_i - F_{i+1} + R_i \quad , \quad i = 0, 1, \dots, n. \tag{4.8}$$

In Gleichung (4.8) sind die  $G_i$  äußere eingeprägte Kräfte (zum Beispiel STOKESsche Reibung  $-k \dot{x}_i$  und/oder Komponenten  $G = mg \sin \alpha$  der Schwerkraft  $m\bar{g}$  bei Bewegung des Wurmes auf einer geneigten Ebene mit dem Steigungswinkel  $\alpha$ , siehe Abschnitt 5.10). Die  $F_i$  sind innere Kräfte ( $F_0 = F_{n+1} = 0$ ) und die  $R_i$  Zwangskräfte. Letztere haben ihre Ursache in den Zwangsbedingungen (4.5) und erfüllen mit den Geschwindigkeiten  $\dot{x}_i$  die Forderung

$$\dot{x}_i \geq 0 \quad , \quad R_i \geq 0 \quad , \quad \dot{x}_i R_i = 0 \quad , \quad \forall i. \tag{4.9}$$

Im folgenden sei von gegebenen kinematischen Steuerungen  $l_j(t)$  ausgegangen, d.h. die Antriebe  $F_i$  seien von der Art, dass sie genau die gegebenen  $l_j(t)$  exakt realisieren. Dann sind die Größen  $\dot{S}_i$  und somit  $V_0$  gegebene Funktionen der Zeit. Eine Aufsummierung aller Impulssätze (4.8) liefert mit den eingepägten Kräften  $G_i = -k \dot{x}_i - G$  die Bewegungsdifferentialgleichung für das System mit dem Freiheitsgrad 1 in der Form

$$\left. \begin{aligned} m\dot{w} + kw + S = R \quad , \quad w \geq 0, R \geq 0, wR = 0, \\ S := m\dot{W}_0 + kW_0 + G \quad , \quad W_0 := V_0 - \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n \dot{S}_i, \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

$$\text{mit } R = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n R_i.$$

Im Fall 1  $\{w > 0, R = 0\}$  ist kein Massenpunkt in Ruhe, im Fall 2  $\{w = 0, R > 0\}$  gibt es mindestens einen Massenpunkt  $k$ , dessen Spikes aktiv (d.h. im Einsatz) sind und für dessen Geschwindigkeit  $\dot{x}_k = 0$  gilt.

Die Bewegung des Wurms kann somit vollständig über die Funktionen  $l_j(t)$  gesteuert werden. Als Gait bezeichnet man die Abbildung  $t \mapsto l_j(t) \geq 0, j = 1, \dots, n$ . Jedem kinematischen Gait entspricht ein bestimmtes Bewegungsmuster des Lokomotionssystems (siehe dazu ausführlicher Abschnitt 5.7).

Bemerkung: Das englische Wort Gait, eigentlich für Gang oder Gangart stehend, bezieht sich auf eine Fortbewegung mit Beinen. In [www1] ist folgende Definition zu finden: Ein Gait ist eine Weise des Gehens oder der Bewegung zu Fuß, oder eine Reihenfolge der Fußbewegungen. In der Mechanik der Lokomotionssysteme wird der Begriff allgemeiner verwendet. Er steht generell für ein Bewegungsmuster bei einem System, für dessen Fortbewegung insgesamt eine Relativbewegung von Teilsystemen untereinander notwendig ist. So ist für die Lokomotion des in dieser Arbeit untersuchten TM-ROBOT die (schrittmotorgesteuerte) Änderung der Abstände zwischen jeweils zwei Teilmassen erforderlich. So wird auch in dieser Arbeit unter dem Begriff Gait verallgemeinert ein konkreter Bewegungsalgorithmus verstanden.

#### 4.1.4 Bewegungsprinzip

In der Regel (wenn nicht generell bei allen Lokomotionssystemen) ist die Fortbewegungsart des Wurmes eine undulatorische Lokomotion. Hier gehen die Begriffsbezeichnungen zwischen Biologie und Mechanik, wie schon im Abschnitt 3.2 dargestellt, auseinander. **In der Biologie** wird eine Fortbewegung auf der Basis einer wellenförmigen Deformation des Körper (etwa wie beim Fisch) als Undulation bezeichnet.

Unter undulatorischer Lokomotion im **Sinne der Mechanik** wird folgendes verstanden: Irgendeine nicht näher betrachtete Erregung wird in die Aktuatoren hineingebracht. Diese Erregung kann von außen kommen (Steuerung), oder sie kann endogen sein, also im Inneren erzeugt werden (Regelung). Über die Erregung generiert der Aktuator eine Gestaltänderung, in der Regel eine periodische Gestaltänderung des Wurms. Praktisch werden dies lokale Dehnungen des Wurms sein. Durch die Wechselwirkung mit der Umgebung (Reibung) wird schliesslich eine globale Lageänderung erzeugt.

Diese Betrachtungen basieren auf der verallgemeinernden Definition der undulatorischen Lokomotion von MURRAY: „**Undulatory locomotion** is the process of generating net displacements of a robot via coupling internal deformations to an interaction between the robot and its environment“ [Murray95].

## 4.2 Lokomotion

### 4.2.1 Vorbemerkung

Im Mittelpunkt der Arbeit stehen technische Systeme, die in der Lage sind eine Lokomotion auszuführen. So erscheint es nur verständlich, diesen Begriff

- zu definieren und
- ein Maß dafür festzulegen.

In der Literatur sind die Begriffe Bewegung bzw. Fortbewegung (Lokomotion) bereits von zahlreichen Autoren in unterschiedlichen Kontexten definiert worden sind, z.B. [Steigenberger04], [Dowling97], [Forth76], aber auch in [www2] oder [www3]. In [Huang03] wurden Ausführungen zur Fortbewegung *im Allgemeinen* und zu den damit im Zusammenhang stehenden Phänomenen wie Reibung, Stabilität und Nichtlinearität gemacht.

Abhängig vom fachlichen Hintergrund der Autoren bewegen sich die von Mathematikern, Ingenieuren oder Vertretern der „life sciences“ gegebenen Definitionen im Spektrum von streng mathematischen Formulierungen mit Hilfe von Abbildungen bis zu eher populärwissenschaftlichen Erläuterungen einer Fortbewegung. Einige Autoren (siehe MURRAY, Abschnitt 4.1.3) verzichten gänzlich auf eine Definition und verwenden solche Begriffe wie „net displacement“, was eher einen umschreibenden Charakter besitzt bzw. selbst der Erläuterung bedarf.

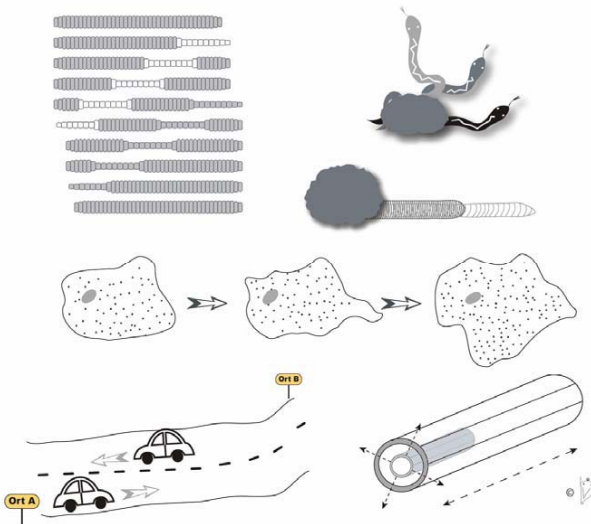


Abbildung 4.5: Lokomotion ja oder nein?

Tatsächlich erweist es sich als schwierig, eine aus Sicht der Mechanik (dort ist die Bewegung ein zentraler Gegenstand) umfassende Definition des Begriffes Lokomotion zu geben. Die Abbildung 4.6 soll diese Problematik „Lokomotion ja oder nein?“ illustrieren.

Im folgenden Abschnitt soll auf wurmartige Bewegungssysteme und deren Lokomotion *im Speziellen* eingegangen werden. Insbesondere wird der Versuch unternommen, den Begriff Lokomotion mathematisch strenger zu fassen. Dabei soll erneut unterstrichen werden, dass die Definition, dem Gegenstand der Arbeit entsprechend, vorrangig für Probleme im  $\mathbb{R}$  verwendet wird. Gleichzeitig zeigen viele Anwendungen die Sinnfälligkeit der Definition auch für eine Lokomotion im zwei- und dreidimensionalen Raum (bei immer zu konstruierenden Gegenbeispielen s.o.).

Unter Lokomotion (Fortbewegung) wird im Allgemeinen die gerichtete Ortsveränderung natürlicher oder technischer Systeme verstanden. Dies ist aber keine strenge Definition, auf der weitere Untersuchungen aufbauen könnten. Auch ein Maß für die Fortbewegung kann daraus nicht angegeben werden. Dazu bedarf es zusätzlicher Betrachtungen.

1. Für die Betrachtung der Lokomotion eines konkreten Objektes wird ein charakteristisches Zeitintervall  $T$  ausgewählt.

Wenn die Bewegung des betrachteten Objektes zum Beispiel Elemente mit periodischem Charakter besitzt, so wird man als charakteristische Zeit die Periodendauer wählen. Das Maß der Fortbewegung hängt vom gewählten Zeitintervall  $T$  ab.

2. Da unter dem Begriff Lokomotion eine gerichtete Bewegung verstanden wird, werden ausschließlich oszillierende Bewegungen um eine fixierte Lage ausgeschlossen.
3. Verschiedene Punkte eines Objektes können verschiedene Lageänderungen erfahren. Einige können sich gerichtet bewegen, andere können periodische Bewegungen (harmonische Schwingungen) ausführen und wiederum andere im Raum fixiert bleiben.

Im Folgenden wird verlangt, dass für eine Lokomotion die Bewegung aller Punkte notwendig ist, wobei durchaus Größe und Richtung der Lageänderung der Punkte verschieden sein können. Wie ist in diesem Fall ein Maß für die Lokomotion zu finden?

Die Definition eines Maßes für die Lokomotion führt über die Auswahl eines charakteristischen Punktes für das Objekt. Dies kann der Massenmittelpunkt des Objektes sein, der für einige natürliche Bewegungssysteme, wie Schlangen und Würmer, während der Lokomotion auch außerhalb des Systems liegen kann. Er gibt dann aber wenig Auskunft über die Lokomotion der Schlange oder des Wurms.

Zur Definition der Lokomotion wird deshalb neben einem charakteristischen Zeitintervall auch ein charakteristischer („natürlicher“) Zustand des Objektes herangezogen, für den der Massenmittelpunkt  $S$  mit dem Ortsvektor im körperfesten Koordinatensystem  $\vec{\xi}_S$  definiert wird. Zum Beispiel kann als natürlicher Zustand für Schlangen und Würmer der geradlinige, nichtdeformierte Zustand angesehen werden, in dem bei homogener Massenverteilung der Massenmittelpunkt in der Mitte liegt.

#### 4.2.2 Definition des Begriffes Lokomotion

Mit den im vorangegangenen Abschnitt gemachten Vorbemerkungen wird der Begriff Lokomotion wie folgt definiert.

**Definition:** Es sei  $\vec{\xi} = (\xi_1, \dots, \xi_n)^T$  ein Ortsvektor im raumfesten Koordinatensystem zum materiellen Punkt  $P$ , welcher zu einem abgeschlossenen Gebiet  $\bar{D}$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  gehört. Die  $\xi_i$  seien körperfeste Koordinaten. Die Menge  $\tilde{M}$  aller inneren Punkte  $P(\vec{\xi})$  des Gebietes bildet zusammen mit der Grenze  $\Gamma$  den betrachteten Körper zum Zeitpunkt  $t = 0$ . Mit  $\vec{u}(\vec{\xi}, t)$  wird die Verschiebung des Punktes  $P(\vec{\xi})$  zur Zeit  $t$  bezeichnet. Lokomotion im Zeitintervall  $T$  heißt die Bewegung des Körpers genau dann, wenn die Verschiebung  $\vec{U}(\vec{\xi})$  aller Punkte des Körpers im Moment  $t = T$  von Null verschieden ist, d.h. wenn gilt:

$$\vec{U}(\vec{\xi}) = \vec{u}(\vec{\xi}, T) \neq 0 \quad (4.11)$$

für alle Punkte  $P(\vec{\xi}) \in \bar{D} \cup \Gamma$ .

Bei Erfüllung der Bedingung (4.11) wird als Maß für die Lokomotion definiert

- die Verschiebung  $\vec{U}_S$  des im „natürlichen“ Zustand definierten Massenmittelpunktes  $S$  ( $\vec{\xi}_S$ ) zur Zeit  $T$

$$\vec{U}_S = \vec{U}(\vec{\xi}_S) \quad (4.12)$$

oder

- die mittlere Verschiebung aller Punkte des Körpers zur Zeit  $T$ :

$$\vec{U}_m = \frac{1}{V} \int_D \vec{U}(\vec{\xi}) dV, \quad (4.13)$$

mit  $V$  als Volumen des Körpers, gleichbedeutend mit der Verschiebung des geometrischen Schwerpunktes.

Ist  $\tilde{M}$  eine diskrete Menge mit den Elementen  $P_i(\vec{\xi}_i)$  ( $i = 1, \dots, N$ ), dann nimmt die Beziehung (4.13) die Form

$$\vec{U}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{U}(\vec{\xi}_i) \quad (4.14)$$

an.

Nachfolgend soll anhand zweier Beispiele die Anwendung der Definition erläutert werden. Dabei wird als Modell des wurmartigen Lokomotionssystems sowohl ein Kontinuum als auch ein Massensystem betrachtet.

### Beispiel 1:

Der Wurm wird als eindimensionales Kontinuum (stetig verteilte Massenpunkte entlang der  $x$ -Achse) modelliert (Abb. 4.7). Mit  $l_0$  wird die Länge des nicht deformierten Wurms bezeichnet. Auf dem Wurm selbst wird die körperfeste Koordinate  $\xi$  mit  $\xi \in [0, l_0]$  eingeführt.

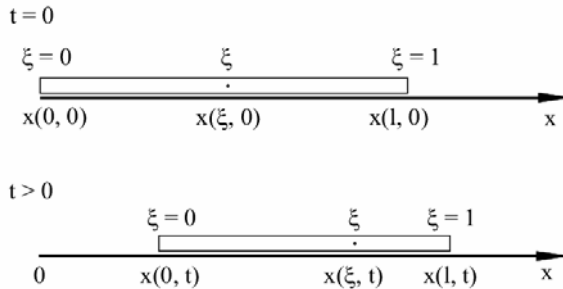


Abbildung 4.6: Der Wurm als eindimensionales Kontinuum.

Jede gegebene Funktion  $\varepsilon(\xi, t)$ , mit

$$\varepsilon(\xi, t) = \frac{dx - d\xi}{d\xi} = \frac{x(\xi + d\xi, t) - x(\xi, t) - d\xi}{d\xi} = \frac{\partial x(\xi, t)}{\partial \xi} - 1 \quad (4.15)$$

als Längsdehnung (lokale Extension) des Wurms, wird „kinematisches Gait“ genannt.

Da es zu keiner Massendurchdringung im Wurm kommen kann, gilt die Bedingung

$$\frac{\partial x(\xi, t)}{\partial \xi} > 0, \quad \forall \xi \in [0, l_0] \quad \forall t \in \mathbb{R}_+ \quad (4.16)$$

(bzw.  $\varepsilon(\xi, t) > -1$ ).

Wenn Spikes kontinuierlich am Wurm verteilt sind, dann gelten für jede Bewegung die zusätzlichen differentiellen Zwangsbedingungen

$$\frac{\partial x(\xi, t)}{\partial t} \geq 0, \quad \forall \xi \in [0, l_0] \quad \forall t \in \mathbb{R}_+ \quad (4.17)$$

Im betrachteten Beispiel 1 ist die Verschiebung  $u$  des Punktes  $\xi$  zur Zeit  $t$  durch eine stetige Funktion in  $\xi$  gegeben. Sie lautet

$$u(\xi, t) = x(\xi, t) - x(\xi, 0) = x(\xi, t) - \xi \quad (x(\xi, 0) = \xi). \quad (4.18)$$

Unter Berücksichtigung von (4.15) sind die Verschiebung  $u(\xi, t)$  und die Längsdehnung  $\varepsilon(\xi, t)$  über die Beziehung

$$\frac{\partial u(\xi, t)}{\partial \xi} = \frac{\partial x(\xi, t)}{\partial \xi} - 1 = \varepsilon(\xi, t) \quad (4.19)$$

verbunden.

Für zwei ausgewählte Gaits soll nachfolgend ein Test auf Lokomotion des Wurms in der Zeit  $T = 1$  erfolgen.

**Fall I**  $u(\xi, t) = a\xi t$  bzw.  $\varepsilon(\xi, t) = at$  ( $a > 0$ ).

Damit gilt gemäß Definition

$$U(\xi) = u(\xi, T) = a\xi,$$

und folglich ist  $U(0) = 0$ . Das bedeutet, der „Kopf“ des Wurmes bleibt unbewegt, obwohl alle anderen Punkte des Wurmes eine Verschiebung, proportional zu ihrem Abstand vom Kopf, erfahren. Es handelt sich somit **nicht** um eine Lokomotion.

**Fall II**  $u(\xi, t) = a \left( \frac{\xi^2}{l_0} + 2l_0 \right) t$  bzw.  $\varepsilon(\xi, t) = \frac{2a\xi t}{l_0}$  ( $a > 0$ ).

In diesem Fall ist

$$U(\xi) = u(\xi, 1) = a \left[ \frac{\xi^2}{l_0} + 2l_0 \right] > 0, \quad 0 \leq \xi \leq l_0,$$

und es handelt sich um eine Lokomotion.

Der Massenmittelpunkt S im „natürlichen“ Zustand ist bestimmt durch  $\xi_S = \frac{1}{2} l_0$ .

Damit gilt als Maß für die Lokomotion im Zusammenhang mit dem Massenmittelpunkt  $U_S = U\left(\frac{1}{2} l_0\right) = \frac{7}{4} a l_0$ .

Die mittlere Verschiebung aller Punkte des Körpers zur Zeit  $T$  ist

$$U_m = \frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} a \left( \frac{\xi^2}{l_0} + 2l_0 \right) d\xi = \frac{4}{3} a l_0.$$



Die Differenz in den Maßdefinitionen ergibt sich aus der nichtlinearen Abhängigkeit der Verschiebung  $u$  von der Koordinate  $\xi$ .

### Beispiel 2:

Betrachtet wird die Bewegung des Systems bestehend aus 3 Massenpunkten (Abb. 4.8).  $x_0(t)$ ,  $x_1(t)$  und  $x_2(t)$  beschreiben die entsprechend Massenpunkte bezüglich der raumfesten Koordinaten  $x$ .

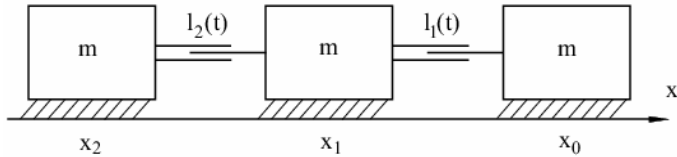


Abbildung 4.7: Lokomotionssystem aus drei Elementen.

In diesem Fall besteht die Menge  $\tilde{M}$  aus drei Elementen:

$$\xi_0 = x_0(0), \quad \xi_1 = x_1(0), \quad \xi_2 = x_2(0),$$

wobei ohne Beschränkung der Allgemeinheit  $\xi_2 = 0$  gesetzt werden kann. Die kinematischen Gaits seien mit  $l_1(t)$  und  $l_2(t)$ , d.h. mit den Abständen zwischen den Massenpunkten, charakterisiert (analog zu den Längsdehnungen im Kontinuumsmodell).

Mit der Annahme  $l_i(0) = l_0$ , wird  $l_i(t)$  in der Form

$$l_i(t) = l_0 + L_i(t),$$

mit  $L_i(0) = 0$ ,  $i = 1, 2$  dargestellt.

Die Berechnung der Verschiebung  $u_i(t)$  der Massenpunkte ergibt

$$u_0(t) = x_0(t) - \xi_0, \quad u_1(t) = x_1(t) - \xi_1, \quad u_2(t) = x_2(t) - \xi_2.$$

Hierbei sind

$$\xi_0 = x_0(0) = 2l_0, \quad \xi_1 = x_1(0) = l_0, \quad \xi_2 = x_2(0) = 0.$$

Daraus folgt

$$u_0(t) = x_0(t) - 2l_0, \quad u_1(t) = x_1(t) - l_0, \quad u_2(t) = x_2(t)$$

und unter Berücksichtigung der Differenzen der Koordinaten  $x_i(t)$

$$x_0(t) - x_1(t) = l_1(t) = l_0 + L_1(t), \quad x_1(t) - x_2(t) = L_2(t) = l_0 + L_2(t)$$

folgt schließlich

$$u_0(t) = x_2(t) + L_1(t) + L_2(t), \quad u_1(t) = x_2(t) + L_2(t), \quad u_2(t) = x_2(t).$$

Angenommen, das Bewegungsgesetz  $x_2(t)$  für den Massenpunkt 3 („Schwanz“) sei eine bekannte Funktion der Zeit. Sie kann entweder als kinematische Größe gegeben oder als Resultat einer dynamischen Analyse ermittelt worden sein. Außerdem sollen die Funktionen  $L_1(t)$  und  $L_2(t)$  periodische Funktionen mit der Periode  $T$  sein. Dann gilt wegen  $L_1(0) = L_2(0) = 0$  auch  $L_1(T) = L_2(T) = 0$  und somit für die Verschiebungen

$$u_0(T) = u_1(T) = u_2(T) = x_2(T).$$

Das bedeutet, dass das Vorhandensein oder Fehlen einer Lokomotion im Moment  $t = T$  durch den Funktionswert  $x_2(T)$  bestimmt wird. Wenn  $x_2(T) \neq 0$  ist, dann ist die Verschiebung aller drei Massenpunkte verschieden von Null, und es gibt eine Lokomotion. Im anderen Fall existiert keine Lokomotion.

Im Folgenden soll das Maß der Fortbewegung bestimmt werden.

Der Massenmittelpunkt  $\xi_S$  im „natürlichen“ Zustand im Moment  $t = 0$  fällt mit dem mittleren Massenpunkt zusammen, d.h.  $\xi_S = \xi_1 = x_1(0)$ . Dann ist die Verschiebung des Massenmittelpunktes  $U_S$  zum Zeitpunkt  $t = T$

$$U_S = u_1(T) = x_2(T) + l_2(T) = x_2(T).$$

Somit ist das Maß der Fortbewegung durch die Verschiebung des „Schwanzes“ von seiner Anfangslage aus innerhalb der Periode  $T$  bestimmt.

Die Definition der Fortbewegung über den Mittelwert der Verschiebung aller drei Massenpunkte nach (4.14) ergibt im Moment  $T$ :

$$U_m = \frac{1}{3}[u_1(T) + u_2(T) + u_3(T)] = \frac{1}{3}[3x_2(T) + l_1(T) + l_2(T)] = x_2(T).$$

Wie zu erkennen ist, ergeben in diesem Fall beide Maßbestimmungen den gleichen Wert.

## 5. Kapitel

### Prototyp I (TM-ROBOT)

#### 5.1 Prototyp-Aufbau

Zur experimentellen Evaluierung der theoretischen Ergebnisse und von vorangegangenen Simulationsrechnungen aus [Steigenberger04] wurde ein elektromechanisches Bewegungssystem aufgebaut (Abb. 5.1). Der Prototyp besteht aus 3 Körpern, von denen zwei mit Schrittmotoren versehen sind, während ein Körper passiv bleibt (Dummy).

Dieses wurmartige System ist aus Sicht der Mechanik mit dem Modell aus Abbildung 4.8 adäquat beschreibbar. Alle drei Körper haben die gleiche Masse. Eine Schraubspindel verbindet die drei Massenpunkte (zwei Schrittmotoren mit Schraubspindeln und den Dummy) miteinander (Abb. 5.2).

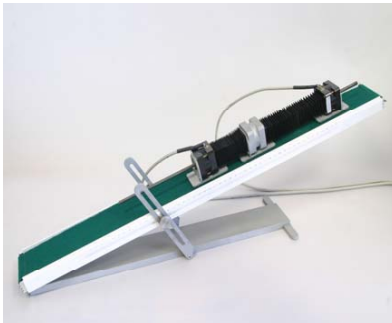


Abbildung 5.1: Wurmartiger Prototyp mit drei Massenpunkten.

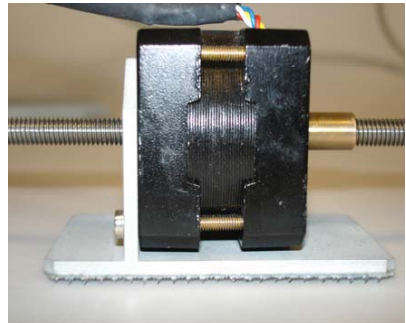


Abbildung 5.2: Ein Element (Schrittmotor) des Prototyps mit den „Spikes“ an der Unterseite.

Über eine separate Ansteuerung der Motoren (Richtung und Geschwindigkeit) können die Abstände  $l_i(t)$  zwischen den Massen eingestellt werden. Damit wird die gesamte Bewegung des Systems durch Abstandsänderungen zwischen  $x_0$  und  $x_1$  ( $l_1 := x_0 - x_1$ ) bzw. zwischen  $x_1$  und  $x_2$  ( $l_2 := x_1 - x_2$ ) definiert.

## 5.2 Motivation für die Nutzung nichtsymmetrischer Reibung

Um die Wirkungsweise der nichtsymmetrischen Reibung basierend auf einer Spikes-Struktur für die Effizienz der Lokomotion zu verdeutlichen, wird kurz auf den Fall symmetrischer Reibung zwischen den Körpern und der Unterlage eingegangen. Die so erzielte, weniger effiziente Lokomotion wurde bereits in [Huang03] analysiert und u.a. mit dem System von MILLER [Miller88] und KOTAY [Kotay96] realisiert. Die Tabelle 5.1 fasst alle möglichen Kombinationen von Ansteuerungen der Motoren ausgedrückt über die  $i_i(t)$  zusammen. Es handelt sich dabei um ein rein kinematische Betrachtung.

Ansteuerung		Geschwindigkeiten		
		$\dot{x}_0$	$\dot{x}_1$	$\dot{x}_2$
$i_1 \geq 0;$ $i_2 \geq 0.$		$= \dot{i}_1 \geq 0$	0	$= -\dot{i}_2 \leq 0$
$i_1 \geq 0;$ $i_2 \leq 0.$	$ \dot{i}_1  =  \dot{i}_2 $	0	$= -\dot{i}_1 = \dot{i}_2 \leq 0$	0
	$ \dot{i}_1  >  \dot{i}_2 $	$= \dot{i}_1 + \dot{i}_2 > 0$	$= \dot{i}_2 < 0$	0
	$ \dot{i}_1  <  \dot{i}_2 $	0	$= -\dot{i}_1 < 0$	$= \dot{i}_1 + \dot{i}_2 > 0$
$i_1 \leq 0;$ $i_2 \geq 0.$	$ \dot{i}_1  =  \dot{i}_2 $	0	$= -\dot{i}_1 = \dot{i}_2 \geq 0$	0
	$ \dot{i}_1  >  \dot{i}_2 $	$= \dot{i}_1 + \dot{i}_2 < 0$	$= \dot{i}_2 > 0$	0
	$ \dot{i}_1  <  \dot{i}_2 $	0	$= -\dot{i}_1 > 0$	$= \dot{i}_1 + \dot{i}_2 < 0$
$i_1 \leq 0;$ $i_2 \leq 0.$		$= \dot{i}_1 \leq 0$	0	$= -\dot{i}_2 \geq 0$

Tabelle 5.1: Geschwindigkeiten der Massenpunkten bei symmetrischer Reibung (ohne Spikes).

Mit Hilfe dieser Tabelle kann ein geeignetes Gait für die Bewegung bestimmt werden.

### Bewegung des Roboters in positiver x-Richtung („vorwärts“):

- Bewegung der Masse 0 ( $x_0$ ): Es ist zu erkennen, dass nur zwei Kombinationen von  $i_1$  und  $i_2$  die Masse 0 nach rechts bewegen, und zwar  $(i_1 \geq 0; i_2 \geq 0)$  und  $(i_1 \leq 0; i_2 \geq 0)$ , mit  $|\dot{i}_1| > |\dot{i}_2|$ ,

- bei der ersten Kombination muss  $\dot{l}_2$  den Wert 0 haben, um eine Bewegung der Masse 2 in negativer x-Richtung zu vermeiden,
- bei der zweiten Kombination verringert  $\dot{l}_2$  die Geschwindigkeit der Masse 0  $\dot{x}_0$  und führt zu einer Bewegung der Masse 1 in negativer x-Richtung.
- Bewegung der Masse 1 ( $x_1$ ): Es gibt nur eine Möglichkeit, um die Masse 1 in positiver x-Richtung zu bewegen, und zwar mit  $(\dot{l}_1 \leq 0; \dot{l}_2 \geq 0)$  und  $|\dot{l}_1| = |\dot{l}_2|$ . Bei  $|\dot{l}_1| \neq |\dot{l}_2|$  wird die Geschwindigkeit  $\dot{x}_1$  verringert, und unerwünschte negative Geschwindigkeiten  $\dot{x}_0$  oder  $\dot{x}_2$  kommen hinzu (gelbe Zellen in der Tabelle).
- Bewegung der Masse 2 ( $x_2$ ): Die zwei Kombinationen von  $\dot{l}_1$  und  $\dot{l}_2$ , um die Masse 0 in positiver x-Richtung zu bewegen, sind  $(\dot{l}_1 \leq 0; \dot{l}_2 \leq 0)$  und  $(\dot{l}_1 \geq 0; \dot{l}_2 \leq 0)$ , mit  $|\dot{l}_1| < |\dot{l}_2|$ ,
  - bei der ersten Kombination muss  $\dot{l}_1$  den Wert 0 haben, um eine Bewegung der Masse 0 in negativer x-Richtung zu vermeiden,
  - bei der zweiten Kombination „bremst“  $\dot{l}_1$  die Masse 2 ab und führt zu einer Bewegung der Masse 1 in negativer Richtung.

Die Tabelle zeigt, dass somit nur ein Gait für die Bewegung in positiver x-Richtung (Vorwärtsbewegung) geeignet ist (grüne Zellen). Dieses Gait lautet:

$$G_1 = \begin{cases} \dot{l}_1 > 0, \dot{l}_2 = 0; & [0, T/3] \\ \dot{l}_1 < 0, \dot{l}_2 > 0; & [T/3, 2T/3] \\ \dot{l}_1 = 0, \dot{l}_2 < 0; & [2T/3, T] \end{cases} \quad \text{mit } T: \text{ Periode des Gaits.}$$

### **Bewegung des Roboters in negativer x-Richtung („rückwärts“):**

Das geeignete „Rückwärts-Gait“ zeigen die roten Zellen in der Tabelle.

Dieses Gait lautet:

$$G_2 = \begin{cases} \dot{l}_1 = 0, \dot{l}_2 > 0; & [0, T/3] \\ \dot{l}_1 > 0, \dot{l}_2 < 0; & [T/3, 2T/3] \\ \dot{l}_1 < 0, \dot{l}_2 = 0; & [2T/3, T] \end{cases} \quad \text{mit } T: \text{ Periode des Gaits.}$$

Blaue Zellen zeigen das Gait mit negativer Geschwindigkeit  $\dot{x}_1$ . Um die Bewegung effizienter zu gestalten und zur praktischen Realisierung der Zwangsbedingungen aus Kapitel 4, wird das Bewegungssystem daher mit einer speziellen Borstenstruktur (Spikes) an der Kontaktfläche zur Unterlage ausgerüstet, um solche unerwünschte Bewegungen zu vermeiden. Diese Borstenstruktur wird in folgendem Abschnitt beschrieben.

### 5.3 Verwendung einer Spikesstruktur

Die verwendete Spikesstruktur (Abb. 5.3) erfüllt im idealen Fall zwei Aufgaben:

- Sie verhindert aufgrund der hinreichend großen Rauheit der Struktur negative Geschwindigkeiten der Massen (siehe Theorie unter 4.1.3)
- Sie ermöglicht die Nutzung von neuen Gaits, die die Geschwindigkeit des Bewegungssystems im Vergleich zu Abschnitt 5.1 erhöhen (oder zum Beispiel auch konstant werden lassen können).

In der Praxis realisieren die Spikes/Borsten nicht exakt die Forderung  $\dot{x}_i \geq 0$ . Es entstehen auch negative Geschwindigkeiten, so dass in einem zweiten Modellansatz (Abschnitt 5.7) mit nichtsymmetrischer Reibung gerechnet wird (Abb. 5.4)

Eine bidirektionale Lokomotion des Wurmsystems ist allerdings nicht mehr möglich.

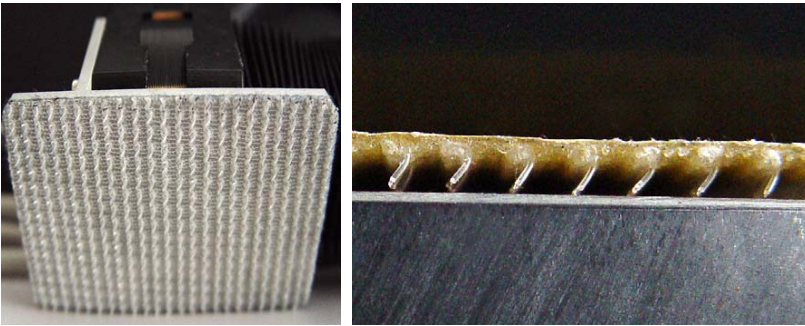


Abbildung 5.3: Aufgeklebte „Spikes“-Struktur.

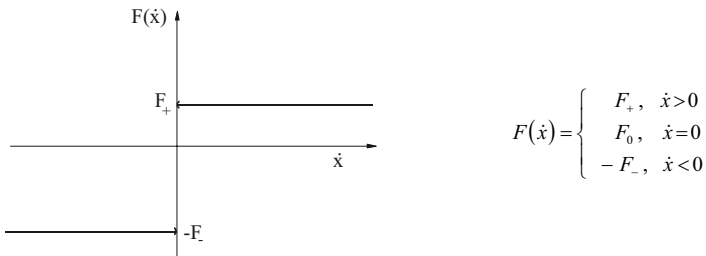


Abbildung 5.4: Nichtsymmetrische Reibung.

$F_0$  tritt im Fall des Gleichgewichts des Systems auf (Stick-slip-effect) und wird in dieser Arbeit nicht diskutiert [Zimmermann05]. Real

## 5.4 Bestimmung von Reibkoeffizienten

Wie schon in Kapitel 4 beschrieben, basiert die Lokomotion des wurmartigen Roboters auf der nichtsymmetrischen Reibung zwischen den Elementen und der Unterlage. In diesem Abschnitt sollen die Eigenschaften der Borstenstruktur spezieller untersucht werden. Mit Blick auf die Realisierung, unter anderem, auch einer zweidimensionalen Bewegung wird die Abhängigkeit des Gleitreibungskoeffizienten vom Material der Unterlage und vom Winkel der Bewegungsrichtung ermittelt (Abb. 5.5).

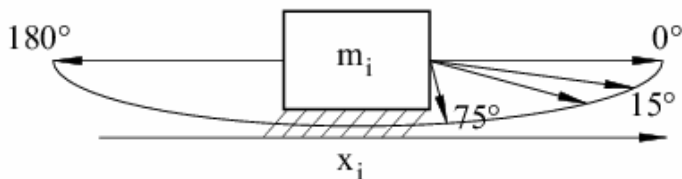


Abbildung 5.5: Zur Messung des Gleitreibungskoeffizienten.

Die Abbildungen 5.6, 5.7 und 5.8 zeigen die Messergebnisse für drei verschiedene Oberflächen (Glas, Holz, textiles Gewebe).

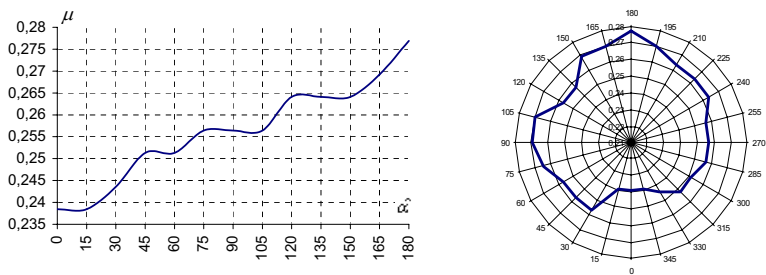


Abbildung 5.6: Reibkoeffizienten (links) und Messergebnisse für alle Bewegungswinkel (rechts) auf einer Glasoberfläche.

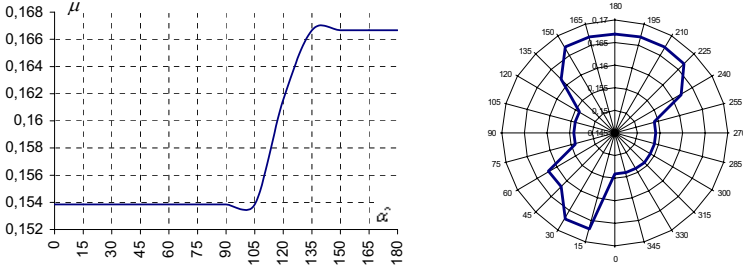


Abbildung 5.7: Reibkoeffizienten (li.) und Messergebnisse für alle Bewegungswinkel (rechts) auf einer Holzoberfläche.

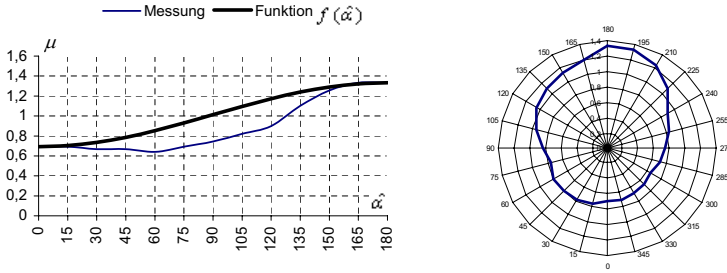


Abbildung 5.8: Vergleich zwischen Reibkoeffizienten und  $f(\hat{\alpha})$  (links) und Messergebnisse für alle Bewegungswinkel (rechts) auf textilem Gewebe.

Die Messergebnisse für textiles Gewebe werden durch die Funktion

$$f(\hat{\alpha}) = \frac{k_+ + k_-}{2} + \frac{k_+ - k_-}{2} \cos \hat{\alpha} \quad \text{mit}$$

- $k_+$  : Reibkoeffizient für die Bewegungsrichtung  $\hat{\alpha} = 0^\circ$
- $k_-$  : Reibkoeffizient für die Bewegungsrichtung  $\hat{\alpha} = 180^\circ$
- $\hat{\alpha}$  : Bewegungswinkel in Abhängigkeit von der Borstenstruktur

approximiert (Abb. 5.8). Dies ist für weitere analytische Untersuchungen von Vorteil.

Es ist deutlich zu sehen, dass die verwendete Borstenstruktur tatsächlich eine nicht-symmetrische Reibung realisieren kann und zwar auf verschiedenen Oberflächen. Der Reibkoeffizient ist auf textilem Gewebe am größten (siehe auch Abb. 6.16 rechts). Das



für die Größe des Reibkoeffizienten die Rauheit nur eine Einflussgröße ist, zeigt der Vergleich zwischen Glas- und Holzoberfläche. Auf der Glasoberfläche ist der Reibkoeffizient größer als auf einer Holzoberfläche, obwohl die Rauheit der Glasoberfläche deutlich kleiner ist. Auch Anisotropieeffekte des Materials spielen eine Rolle.

## 5.5 Steuersoftware

Die Ansteuerung der Schrittmotoren basiert auf der Übergabe von Geschwindigkeitstabellen in definierbaren Taktzeiten. Die Abbildung 5.9 zeigt einen Screenshot der Bedienoberfläche der Steuersoftware [Schütz04]. Der Bewegungsalgorithmus ist graphisch dargestellt. Die Eingabe erfolgt über einen Editor in Form einer ASCII-Tabelle (Abb. 5.10). In der ersten Zeile ist die Taktzeit (hier 100ms) angegeben. Die zweite Zeile enthält die Startzeit für den ersten bzw. zweiten Schrittmotor. Die dritte Zeile gibt die Zahl der Zeittakte für jeden Motor für einen Zyklus an. Der letzte Teil der Tabelle besteht aus zwei Spalten, die die Geschwindigkeit der Motoren (genauer die Prozente der maximalen Geschwindigkeit) in jedem Schritt angeben.

Die Fenster „Weg M1“ und „Weg M2“ zeigen die an der Motorwelle realisierten aufsummierten Drehwinkel. Mit „Diff. M1“ und „Diff. M2“ sind die Differenzen zwischen den positiven und den negativen Wegen (hier Winkel) der Motoren bezeichnet. Nach einem Bewegungszyklus bestehend aus Rechts- und Linksdrehung soll diese Winkeldifferenz herstellerbedingt für jeden Motor 0 sein. Dies wird softwaretechnisch realisiert. Da für die Bewegungssteuerung vom Anwender nur Geschwindigkeiten vorgegeben werden, kann es zu unterschiedlichen Winkelstellungen der Motoren kommen. In der praktischen Anwendung wurde der Einfachheit halber immer auf „symmetrische“ Tabellen bezüglich des Vorzeichens zurückgegriffen.

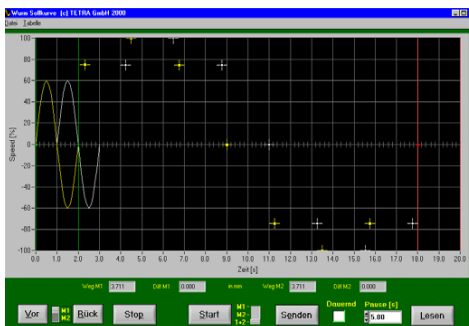


Abbildung 5.9: Steuersoftware des Roboters.

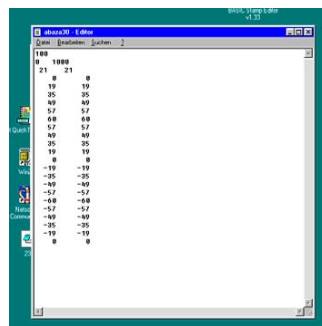


Abbildung 5.10: ASCII-Tabelle zur Steuerung.

## 5.6 Verbindung von Simulations- und Steuersoftware

Um die in den theoretischen Berechnungen enthaltenen Parameter durch tatsächliche Werte des schrittmotorgetriebenen Prototyps zu ersetzen und danach die Ergebnisse zu evaluieren, wurde in Excel eine aufgabenspezifische Software erstellt. Diese erzeugt aus

den realen Motorenparametern mit dem Input der im Kapitel 4 formulierten Gaits  $\dot{l}_i(t)$  als Output die notwendigen ASCII-Tabellen zur Ansteuerung der Schrittmotoren. Das Programm wandelt somit die  $\dot{l}_i(t)$  in eine Funktion Motorengeschwindigkeiten pro Taktzeit um:

$t \mapsto$  Motorgeschwindigkeit pro Zeiteinheit.

### Das Excelprogramm:

Die tatsächlichen Werte des schrittmotorgetriebenen Prototyps werden durch ein Excelprogramm bearbeitet, um  $\dot{l}_i$ ,  $\dot{x}_i$  und  $x_i$  theoretisch zu berechnen.

Ausgehend von den prozentualen Geschwindigkeiten der Motoren in jedem Zeitschritt konnte die Laufdistanz, die durch den Motor erzielt wurde, errechnet werden. Diese Laufdistanz ist nicht anders als die Längenänderung zwischen den Motoren und dem Dummy.

Abbildung 5.11 zeigt diesen Teil des Excelprogramms.

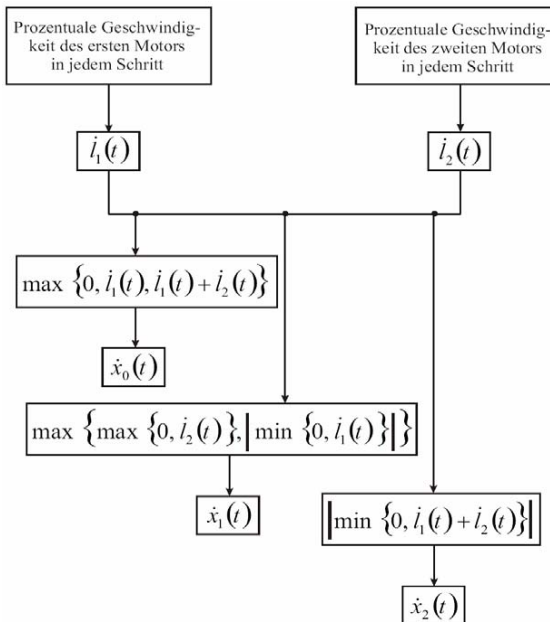


Abbildung 5.11: Berechnung der Geschwindigkeiten der Massenpunkte in Excel.

Es gilt:

- Eine *Vergrößerung* der Länge zwischen dem *ersten* Motor und dem Dummy und/oder zwischen dem *zweiten* Motor und dem Dummy bewirkt eine Bewegung der Masse  $m_0$ .
- Eine *Verkleinerung* der Länge zwischen dem *ersten* Motor und dem Dummy und/oder eine *Vergrößerung* zwischen dem *zweiten* Motor und dem Dummy bewirkt eine Bewegung der Masse  $m_1$ .
- Eine *Verkleinerung* der Länge zwischen dem *ersten* Motor und dem Dummy und/oder zwischen dem *zweiten* Motor und dem Dummy bewirkt eine Bewegung der Masse  $m_2$ .

Aus den Geschwindigkeiten  $\dot{x}_i$  erfolgt die Bestimmung der Lage der Massenpunkte  $x_i$  gemäß der Gleichung:

$$x(t_k) = \dot{x}(t_{k-1}) \cdot \Delta t + x(t_{k-1}).$$

Die Abbildung 5.12 veranschaulicht die beschriebene Prozedur grafisch.

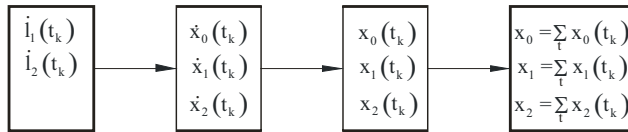


Abbildung 5.12: Prozedur zur Bestimmung der Lagekoordinaten  $x_i$ .

## 5.7 Zur Dynamik des TM-ROBOT

### 5.7.1 Bewegungsbedingungen für die Lokomotion im Kontext der Gaits

Die kinematischen Zwangsbedingungen für den Wurmroboter (Abb. 5.13) lauten

$$\left. \begin{array}{l} x_0 - x_1 = l_1(t) \\ x_2 - x_1 = l_2(t) \end{array} \right\} \quad (5.1)$$

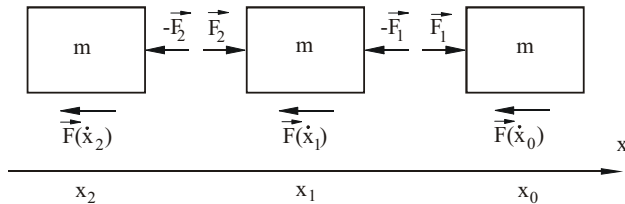


Abbildung 5.13: Schnittkräfte und Reibungskräfte am TM-ROBOT.

Aus den drei Impulssätzen für die Massenpunkte

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x}_2 &= -F_2 - F(\dot{x}_2) \\ m\ddot{x}_1 &= +F_2 - F_1 - F(\dot{x}_1) \\ m\ddot{x}_0 &= +F_1 - F(\dot{x}_0) \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

folgt

$$m(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) = -[F(\dot{x}_0) + F(\dot{x}_1) + F(\dot{x}_2)]. \quad (5.3)$$

Durch Addition der Zwangsbedingungen (5.1) und zweimaliger Ableitung nach der Zeit

$$\ddot{x}_0 + \ddot{x}_1 + \ddot{x}_2 = 3\ddot{x}_0 - 2\ddot{l}_1(t) - \ddot{l}_2(t) \quad (5.4)$$

erhält man aus (5.3) und (5.4)

$$\ddot{x}_0 = \frac{1}{3}(2\ddot{l}_1 + \ddot{l}_2) - \frac{1}{3m}[F(\dot{x}_0) + F(\dot{x}_1) + F(\dot{x}_2)] \quad (5.5)$$

bzw.

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_0 &= \frac{1}{3}(2\ddot{l}_1 + \ddot{l}_2) - \Phi(\dot{x}_0, \dot{x}_1, \dot{x}_2) \\ \ddot{x}_1 &= \frac{1}{3}(\ddot{l}_2 - \ddot{l}_1) - \Phi(\dot{x}_0, \dot{x}_1, \dot{x}_2) \\ \ddot{x}_2 &= -\frac{1}{3}(\ddot{l}_1 + 2\ddot{l}_2) - \Phi(\dot{x}_0, \dot{x}_1, \dot{x}_2) \\ \Phi(\dot{x}_0, \dot{x}_1, \dot{x}_2) &= \frac{1}{3m}[F(\dot{x}_0) + F(\dot{x}_1) + F(\dot{x}_2)] \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

Nachfolgend werden alle Fälle einer Wurmbeugung mit vorgegebenen Bewegungsrichtungen der Massenpunkte 1 bis 3 untersucht. Dabei wird jeweils der Ausdruck  $\Phi(\dot{x}_0, \dot{x}_1, \dot{x}_2)$  bestimmt. Im Ergebnis erhält man notwendige Bedingungen, bei denen eine Lokomotion mit den gegebenen Randbedingungen (Bewegungsrichtungen der Massen 1,2,3) möglich ist. Die Untersuchungen werden für folgende Anfangsbedingungen  $t = 0$ :  $\dot{x}_0 = \dot{x}_1 = \dot{x}_2 = 0$ , und  $\dot{l}_1 = \dot{l}_2 = 0$  realisiert.

### Drei Massenpunkte des Wurmroboters in Bewegung

**1. Fall:**  $\dot{x}_0 > 0$ ,  $\dot{x}_1 > 0$ ,  $\dot{x}_2 > 0$

$$\Rightarrow \Phi = \frac{1}{m}F_+ \geq 0$$

Aus der Gleichung (5.6) folgt:

$$\dot{x}_0 = \frac{1}{3}(2\dot{l}_1 + \dot{l}_2) - \Phi t > 0 \quad (a)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{3}(\dot{l}_2 - \dot{l}_1) - \Phi t > 0 \quad (b)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{3}(\dot{l}_1 + 2\dot{l}_2) - \Phi t > 0 \quad (c)$$

Um diese Bedingungen gelten zu lassen, müssen die nachfolgenden Bedingungen erfüllt sein:

$$\left. \begin{array}{l} 2\dot{l}_1 + \dot{l}_2 > 0 \\ \dot{l}_2 - \dot{l}_1 > 0 \\ \dot{l}_1 + 2\dot{l}_2 < 0 \end{array} \right\} \text{Notwendige Bedingungen}$$

$$\Leftrightarrow \left. \begin{array}{l} \dot{l}_2 > 0 \\ \dot{l}_2 < 0 \end{array} \right\} \text{unmöglich}$$

Fazit: nicht realisierbar ! (Erwartbares Resultat, siehe Mode  $\{0\}$  in [Steigenberger04]).

**2. Fall:**  $\dot{x}_0 > 0$ ,  $\dot{x}_1 > 0$ ,  $\dot{x}_2 < 0$

$$\Rightarrow \Phi = \frac{1}{3m}(2F_+ - F_-)$$

Aus (5.6) folgt:

$$\dot{x}_0 = \frac{1}{3}(2\dot{l}_1 + \dot{l}_2) - \Phi t > 0 \quad (a)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{3}(\dot{l}_2 - \dot{l}_1) - \Phi t > 0 \quad (b)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{3}(\dot{l}_1 + 2\dot{l}_2) - \Phi t < 0 \quad (c)$$

$$\begin{array}{l} (a) - (c) \Rightarrow \dot{l}_1 + \dot{l}_2 > 0 \\ (b) - (c) \Rightarrow \dot{l}_2 > 0 \end{array} \quad (*)$$

Fazit: realisierbar !

- Für  $\Phi \geq 0 \Rightarrow 2F_+ - F_- \geq 0 \Rightarrow F_+ \leq F_- \leq 2F_+$

Notwendige Bedingungen:

$$\begin{aligned} 2\dot{i}_1 + \dot{i}_2 > 0 \\ \dot{i}_2 - \dot{i}_1 > 0 \end{aligned} \quad \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} -\frac{\dot{i}_2}{2} < \dot{i}_1 < \dot{i}_2 \\ \dot{i}_2 > 0 \end{aligned}$$

Fazit: realisierbar !

- Für  $\Phi < 0 \Rightarrow 2F_+ - F_- < 0 \Rightarrow F_- > 2F_+$

Notwendige Bedingung:

$$\begin{aligned} \dot{i}_1 + 2\dot{i}_2 > 0 \quad (*) \\ \Rightarrow \dot{i}_1 > -2\dot{i}_2 \quad \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_1 > -\dot{i}_2 \\ \dot{i}_2 > 0 \end{aligned}$$

Fazit: realisierbar !

- 3. Fall:**  $\dot{x}_0 > 0, \quad \dot{x}_1 < 0, \quad \dot{x}_2 < 0$

$$\Rightarrow \Phi = \frac{1}{3m}(F_+ - 2F_-) \leq 0, \text{ weil } F_- \geq F_+ \geq 0$$

Aus (5.6):

$$\dot{x}_0 = \frac{1}{3}(2\dot{i}_1 + \dot{i}_2) - \Phi t > 0 \quad (a)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{3}(\dot{i}_2 - \dot{i}_1) - \Phi t < 0 \quad (b)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{3}(\dot{i}_1 + 2\dot{i}_2) - \Phi t < 0 \quad (c)$$

$$(a) - (b) \Rightarrow \dot{i}_1 > 0$$

$$(a) - (c) \Rightarrow \dot{i}_1 + \dot{i}_2 < 0$$

Notwendige Bedingung:

$$\dot{i}_2 - \dot{i}_1 < 0 \quad \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} -\dot{i}_1 < \dot{i}_2 < \dot{i}_1 \\ \dot{i}_1 > 0 \end{aligned}$$

Fazit: realisierbar !

## Ein Massenpunkt des Wurmroboters in Bewegung

**4. Fall:**  $\dot{x}_0 > 0$ ,  $\dot{x}_1 = 0$ ,  $\dot{x}_2 = 0$

$$\Rightarrow \Phi = \frac{1}{3m} F_+ \geq 0$$

Aus (5.1):

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= \dot{l}_1 > 0 \\ \dot{l}_2 &= 0 \end{aligned}$$

Aus (5.6):

$$\dot{x}_0 = \frac{1}{3}(2\dot{l}_1 + \dot{l}_2) - \Phi t > 0$$

Notwendige Bedingung:

$$2\dot{l}_1 + \dot{l}_2 > 0 \quad \Rightarrow$$

$\begin{aligned} \dot{l}_1 &> 0 \\ \dot{l}_2 &= 0 \end{aligned}$
--

Fazit: realisierbar !

**5. Fall:**  $\dot{x}_0 = 0$ ,  $\dot{x}_1 < 0$ ,  $\dot{x}_2 = 0$

$$\Rightarrow \Phi = \frac{1}{3m} F_- < 0$$

Aus (5.1):

$$\begin{aligned} -\dot{x}_1 &= \dot{l}_1 < 0 \\ \dot{x}_1 &= \dot{l}_2 > 0 \end{aligned}$$

Aus (5.6):

$$\dot{x}_0 = \frac{1}{3}(2\dot{l}_1 + \dot{l}_2) - \Phi t > 0$$

Notwendige Bedingung:

$$\dot{i}_2 - \dot{i}_1 < 0 \quad \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_1 &> 0 \\ \dot{i}_2 &< 0 \end{aligned}$$

Fazit: realisierbar !

### Zwei Massenpunkte des Wurmroboters in Bewegung

6. Fall:  $\dot{x}_0 < 0$ ,  $\dot{x}_1 < 0$ ,  $\dot{x}_2 = 0$

$$\Rightarrow \Phi = \frac{2}{3m} F_- < 0$$

Aus (5.6):

$$\dot{x}_0 = \frac{1}{3}(2\dot{i}_1 + \dot{i}_2) - \Phi t < 0$$

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{3}(\dot{i}_2 - \dot{i}_1) - \Phi t < 0$$

- Für  $\dot{x}_0 = \dot{x}_1$

Aus (5.1):

$$\dot{i}_1 = 0$$

$$\dot{x}_1 = \dot{i}_2 < 0$$

Notwendige Bedingung:

$$\begin{aligned} 2\dot{i}_1 + \dot{i}_2 &< 0 \\ \dot{i}_2 - \dot{i}_1 &< 0 \end{aligned} \quad \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_1 &= 0 \\ \dot{i}_2 &< 0 \end{aligned}$$

Fazit: realisierbar !

- Für  $\dot{x}_0 > \dot{x}_1$

Aus (5.1):



$$\begin{aligned}\dot{x}_0 - \dot{x}_1 &= \dot{l}_1 > 0 \\ \dot{x}_1 &= \dot{l}_2 < 0\end{aligned}$$

Notwendige Bedingung:

$$\begin{aligned}2\dot{l}_1 + \dot{l}_2 &< 0 \\ \dot{l}_2 - \dot{l}_1 &< 0\end{aligned} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}0 &< \dot{l}_1 < -\frac{\dot{l}_2}{2} \\ \dot{l}_2 &< 0\end{aligned}$$

Fazit: realisierbar !

- Für  $\dot{x}_0 < \dot{x}_1$

Aus (5.1):

$$\begin{aligned}\dot{x}_0 - \dot{x}_1 &= \dot{l}_1 < 0 \\ \dot{x}_1 &= \dot{l}_2 < 0\end{aligned}$$

Notwendige Bedingung:

$$\begin{aligned}2\dot{l}_1 + \dot{l}_2 &< 0 \\ \dot{l}_2 - \dot{l}_1 &< 0\end{aligned} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}\dot{l}_2 &< \dot{l}_1 < 0 \\ \dot{l}_2 &< 0\end{aligned}$$

Fazit: realisierbar !

**7. Fall:**  $\dot{x}_0 > 0$ ,  $\dot{x}_1 = 0$ ,  $\dot{x}_2 > 0$

$$\Rightarrow \Phi = \frac{2}{3m} F_+ \geq 0$$

Aus (5.1):

$$\begin{aligned}\dot{x}_0 &= \dot{l}_1 > 0 \\ -\dot{x}_2 &= \dot{l}_2 < 0\end{aligned}$$

Aus (5.6):

$$\begin{aligned}\dot{x}_0 &= \frac{1}{3}(2\dot{l}_1 + \dot{l}_2) - \Phi t > 0 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{3}(\dot{l}_1 + 2\dot{l}_2) - \Phi t < 0\end{aligned}$$

Notwendige Bedingung:

$$\begin{aligned} 2\dot{l}_1 + \dot{l}_2 &> 0 \\ \dot{l}_1 + 2\dot{l}_2 &< 0 \end{aligned} \quad \Rightarrow$$

$$\boxed{-\dot{l}_2/2 < \dot{l}_1 < -2\dot{l}_2}$$

Fazit: realisierbar !

**8. Fall:**  $\dot{x}_0 > 0$ ,  $\dot{x}_1 < 0$ ,  $\dot{x}_2 = 0$

$$\Rightarrow \Phi = \frac{1}{3m}(F_+ - F_-) \leq 0$$

Aus (5.1):

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 - \dot{x}_1 &= \dot{l}_1 > 0 \\ -\dot{x}_2 &= \dot{l}_2 < 0 \end{aligned}$$

Aus (5.6):

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= \frac{1}{3}(2\dot{l}_1 + \dot{l}_2) - \Phi t > 0 \\ \dot{x}_1 &= \frac{1}{3}(\dot{l}_2 - \dot{l}_1) - \Phi t < 0 \end{aligned}$$

• Für  $\Phi < 0 \Rightarrow F_+ - F_- < 0 \Rightarrow F_+ < F_-$

Notwendige Bedingung:

$$\dot{l}_2 - \dot{l}_1 < 0 \quad \Rightarrow$$

$$\boxed{\begin{aligned} \dot{l}_1 &> 0 \\ \dot{l}_2 &< 0 \end{aligned}}$$

Fazit: realisierbar !

• Für  $\Phi = 0 \Rightarrow F_+ - F_- = 0 \Rightarrow F_+ = F_-$

Notwendige Bedingung:

$$\begin{aligned} 2\dot{l}_1 + \dot{l}_2 &> 0 \\ \dot{l}_2 - \dot{l}_1 &< 0 \end{aligned} \quad \Rightarrow$$

$$\boxed{\begin{aligned} \dot{l}_1 &> -\dot{l}_2/2 \\ \dot{l}_2 &< 0 \end{aligned}}$$

Fazit: realisierbar !

Die Tabelle 5.2 fasst die ermittelten notwendigen Bedingungen für alle möglichen Fälle zusammen.

	Massengeschwindigkeiten			Notwendige Bedingungen	
	$\dot{x}_0$	$\dot{x}_1$	$\dot{x}_2$		
1	$> 0$	$> 0$	$> 0$	nicht realisierbar	
2	$> 0$	$> 0$	$< 0$	$-\frac{i_2}{2} < i_1 < i_2$ für $\Phi \geq 0$	$i_2 > 0$
				$i_1 < -i_2$ für $\Phi < 0$	
3	$> 0$	$< 0$	$> 0$	$-\frac{i_2}{2} < i_1 < i_2$ für $\Phi \geq 0$	$i_2 < 0$
				$i_1 > 0$ für $\Phi < 0$	
4	$> 0$	$< 0$	$< 0$	$i_1 > 0$	$-i_1 < i_2 < i_1$
5	$< 0$	$> 0$	$> 0$	$i_1 < 0$	$i_1 < i_2 < -\frac{i_1}{2}$ für $\Phi \geq 0$
					$i_2 < -i_1$ für $\Phi < 0$
6	$< 0$	$> 0$	$< 0$	$i_1 < 0$	$-\frac{i_1}{2} < i_2 < -2i_1$
7	$< 0$	$< 0$	$> 0$	$i_2 < i_1 < -\frac{i_2}{2}$	$i_2 < 0$
8	$< 0$	$< 0$	$< 0$	nicht realisierbar	
9	$> 0$	0	0	$i_1 > 0$	$i_2 = 0$
10	$< 0$	0	0	$i_1 < 0$	$i_2 = 0$
11	0	$> 0$	0	$i_1 < 0$	$i_2 > 0$
12	0	$< 0$	0	$i_1 > 0$	$i_2 < 0$
13	0	0	$> 0$	$i_1 = 0$	$i_2 < 0$
14	0	0	$< 0$	$i_1 = 0$	$i_2 > 0$

15	> 0	> 0	0	$\dot{i}_1 = 0$ für $\dot{x}_0 = \dot{x}_1$	$\dot{i}_2 > 0$
				$0 < \dot{i}_1 < \dot{i}_2$ für $\dot{x}_0 > \dot{x}_1$	
				$-\frac{\dot{i}_2}{2} < \dot{i}_1 < 0$ für $\dot{x}_0 < \dot{x}_1$	
16	> 0	0	> 0	$-\frac{\dot{i}_2}{2} < \dot{i}_1 < -2\dot{i}_2$	$\dot{i}_2 < 0$
17	0	> 0	> 0	$\dot{i}_1 < 0$	$\dot{i}_2 = 0$ für $\dot{x}_1 = \dot{x}_2$
					$0 < \dot{i}_2 < -\frac{\dot{i}_1}{2}$ für $\dot{x}_1 > \dot{x}_2$
					$\dot{i}_1 < \dot{i}_2 < 0$ für $\dot{x}_1 < \dot{x}_2$
18	< 0	< 0	0	$\dot{i}_1 = 0$ für $\dot{x}_0 = \dot{x}_1$	$\dot{i}_2 < 0$
				$0 < \dot{i}_1 < -\frac{\dot{i}_2}{2}$ für $\dot{x}_0 > \dot{x}_1$	
				$\dot{i}_2 < \dot{i}_1 < 0$ für $\dot{x}_0 < \dot{x}_1$	
19	< 0	0	< 0	$-2\dot{i}_2 < \dot{i}_1 < -\frac{\dot{i}_2}{2}$	$\dot{i}_2 > 0$
20	0	< 0	< 0	$\dot{i}_1 > 0$	$\dot{i}_2 = 0$ für $\dot{x}_1 = \dot{x}_2$
					$-\frac{\dot{i}_1}{2} < \dot{i}_2 < 0$ für $\dot{x}_1 > \dot{x}_2$
					$0 < \dot{i}_2 < \dot{i}_1$ für $\dot{x}_1 < \dot{x}_2$
21	> 0	0	< 0	$\dot{i}_1 > 0$	$\dot{i}_2 > 0$
22	< 0	0	> 0	$\dot{i}_1 < 0$	$\dot{i}_2 < 0$
23	> 0	< 0	0	$\dot{i}_1 > 0$ für $\Phi < 0$	$\dot{i}_2 < 0$
				$\dot{i}_1 > -\frac{\dot{i}_2}{2}$ für $\Phi = 0$	
24	< 0	> 0	0	$\dot{i}_1 < -\frac{\dot{i}_2}{2}$	$\dot{i}_2 > 0$
25	0	> 0	< 0	$\dot{i}_1 > -2\dot{i}_2$	$\dot{i}_2 > 0$

26	0	< 0	> 0	$\dot{l}_1 > 0$ für $\Phi < 0$	$\dot{l}_2 < 0$
				$\dot{l}_1 > -2\dot{l}_2$ für $\Phi = 0$	

Tabelle 5.2: Notwendige Bedingungen für die Lokomotion.

Innerhalb der 26 Varianten gibt es zwei Fälle, die nicht realisierbar sind (Nr.1 und Nr.8), d.h. zu keiner Lokomotion führen. Wie aus dem Bewegungsprinzip von vornherein ableitbar, bestätigt sich, dass eine Lokomotion bei gleichzeitiger Bewegung aller drei Massenpunkte in einer Richtung unmöglich ist.

Bei einigen Fällen ergeben sich zusätzliche Abhängigkeiten von den Werten  $F_+$  und  $F_-$  (Fälle Nr.2, 3, 5, 23 und Nr.26). Bei den Fällen Nr.15, 17, 18 und Nr.20 hängen die Bedingungen von den Werten  $\dot{x}_i$  ab. Es ist zu erkennen, dass einige Fälle zu gleichen Bedingungen führen, zum Beispiel die Fälle Nr.7 und Nr.18.

Wie dargestellt, reicht die Erfüllung der genannten Bedingungen nicht aus, um die entsprechende Bewegung tatsächlich zu realisieren. Sie haben somit keinen hinreichenden Charakter.

### 5.7.2 Bewegungsbedingungen für die Lokomotion im Kontext der Kräfte

Im Ergebnis der Untersuchungen im vorangegangenen Abschnitt wurden, für die Realisierung von definierten Bewegungstypen aus der Ruhelage heraus, notwendige Bedingungen im Kontext der Gaits  $\dot{l}_i(t)$  formuliert. Der Einfluss der Reibkräfte (Abb. 5.13) wurde zusammenfassend mit der Funktion  $\Phi$  erfasst. In der praktischen Realisierung erfolgen die Längenänderungen  $l_i(t)$  durch Kontraktions- oder Extensionskräfte  $F_i(t)$ .

In diesem Abschnitt wird für drei ausgewählte Fälle gezeigt, wie sich die oben genannten notwendigen Bedingungen für die  $\dot{l}_i(t)$  im Kontext der (irgendwie im Innern erzeugten) Kräfte  $F_i$  formulieren lassen.

Die Bewegungsdifferentialgleichungen haben die Form

$$m\ddot{x}_0 = F_1 - F(\dot{x}_0), \quad (5.7)$$

$$m\ddot{x}_1 = F_2 - F_1 - F(\dot{x}_1), \quad (5.8)$$

$$m\ddot{x}_2 = -F_2 - F(\dot{x}_2). \quad (5.9)$$

Nach der Subtraktion der Gleichung (5.8) von (5.7) bzw. (5.9) von (5.8) erhält man unter der Berücksichtigung von

$$x_0(t) - x_1(t) = l_1(t) \quad \text{und} \quad x_1(t) - x_2(t) = l_2(t),$$

die Ausdrücke für die Kräfte  $F_1$  und  $F_2$

$$F_1 = \frac{1}{3}m(2\ddot{l}_1 + \ddot{l}_2) + \frac{1}{3}[2F(\dot{x}_0) - F(\dot{x}_1) - F(\dot{x}_2)], \quad (5.10)$$

$$F_2 = \frac{1}{3}m(\ddot{l}_1 + 2\ddot{l}_2) + \frac{1}{3}[F(\dot{x}_0) + F(\dot{x}_1) - 2F(\dot{x}_2)]. \quad (5.11)$$

Untersucht werden soll, wie bereits im vorangegangenen Abschnitt, die Bewegung des Systems unmittelbar nach der Ruhelage. Zum Anfangszeitpunkt  $t=0$  wird also angenommen, dass  $\dot{x}_0(0) = \dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = 0$  gilt. Für  $t > 0$  werden die  $\dot{x}_i(t)$  ( $i=0,1,2$ ) positiv bzw. negativ, d.h. die Geschwindigkeiten wachsen bzw. fallen in der rechtsseitigen Umgebung des Punktes  $t=0$ . Dies ist gleichbedeutend mit positiven (oder negativen) Beschleunigungen  $\ddot{x}_i(t)$  ( $i=0,1,2$ ) in der genannten Umgebung. Bei der Bewegung existiert in der rechtsseitigen Umgebung des Punktes  $t=0$  folglich die Situation, dass die Vorzeichen der Geschwindigkeiten  $\dot{x}_i(t)$  und der Beschleunigungen  $\ddot{x}_i(t)$  ( $i=0,1,2$ ) gleich sind und somit auch das Vorzeichen der resultierenden Kraft auf den jeweiligen Massenpunkt. Im Folgenden werden drei ausgewählte Fälle betrachtet.

**Fall 1:** 3 Massenpunkte in Bewegung, mit  $\dot{x}_0 > 0$ ,  $\dot{x}_1 > 0$ ,  $\dot{x}_2 < 0$ .

Bezugnehmend auf die getroffenen Aussagen folgt aus dem System (5.7) – (5.9) für diesen Fall 1:

$$m\ddot{x}_0 = F_1 - F_+ > 0,$$

$$m\ddot{x}_1 = F_2 - F_1 - F_+ > 0,$$

$$m\ddot{x}_2 = -F_2 + F_- < 0.$$

Damit erfüllen die beteiligten Kräfte die Ungleichungen

$$F_1 > F_+, \quad F_2 > F_1 + F_+, \quad F_2 > F_-.$$

Die Formeln (5.10) und (5.11) für die Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  nehmen die Form

$$F_1 = \frac{1}{3}m(2\ddot{l}_1 + \ddot{l}_2) + \frac{1}{3}(F_- + F_+),$$

$$F_2 = \frac{1}{3}m(\ddot{l}_1 + 2\ddot{l}_2) + \frac{2}{3}(F_- + F_+)$$

an.

Im Sonderfall für  $\dot{l}_1 = 0$  bewegen sich die zwei Massenpunkte 0 und 1 wie ein starrer Körper  $\ddot{x}_0 = \ddot{x}_1$ . Dann gilt  $F_2 = 2F_1$ ,  $F_2 > 2F_+$ ,  $F_2 > F_-$ .

**Fall 2:** 2 Massenpunkte in Bewegung, mit  $\dot{x}_0 > 0$ ,  $\dot{x}_1 > 0$ ,  $\dot{x}_2 = 0$ .

Dann gelten die Beziehungen

$$m\ddot{x}_0 = F_1 - F_+ > 0,$$

$$m\ddot{x}_1 = F_2 - F_1 - F_+ > 0,$$

wobei  $\dot{x}_0(t) = \dot{l}_1(t) + \dot{l}_2(t)$  und  $\dot{x}_1(t) = \dot{l}_2(t)$  sind. Daraus folgen die Ungleichungen für die Kräfte gemäß  $F_1 > F_+$ ,  $F_2 > F_1 + F_+$ . Die Kraft  $F_2$  ist in diesem Fall positiv, womit die Bedingung für das Verbleiben des Massenpunktes 2 in der Ruhelage  $-F_2 > -F_-$  bzw.  $F_2 < F_-$  heißt. Somit gilt  $F_1 + F_+ < F_2 < F_-$ , wobei gleichzeitig die Beziehung  $F_1 + F_+ < F_-$  bzw.  $F_1 < F_- - F_+$  erfüllt sein muss.

Damit kann geschlossen werden, dass der betrachtete Fall 2 genau dann realisiert wird, wenn  $F_+ < F_1 < F_- - F_+$  und gleichzeitig  $F_1 + F_+ < F_2 < F_-$  gelten,

wobei  $\frac{1}{2}F_- < F_+ \leq F_-$ .

Die Gleichungen für die inneren Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  lauten in diesem Fall

$$F_1 = m(\ddot{l}_1 + \ddot{l}_2) + F_+,$$

$$F_2 = m(\ddot{l}_1 + 2\ddot{l}_2) + 2F_+.$$

**Fall 3:** 1 Massenpunkt in Bewegung, mit  $\dot{x}_0 = \dot{x}_2 = 0$ ,  $\dot{x}_1 < 0$ .

In diesem Fall erhält man aus Gleichung (2)

$$m\ddot{x}_1 = F_2 - F_1 + F_- < 0,$$

mit  $\dot{x}_1(t) = \dot{l}_2(t)$ , und das kinematische Gait muss die Bedingung  $\dot{l}_1(t) + \dot{l}_2(t) = 0$  erfüllen. Somit ist

$$F_1 > F_2 + F_- . \tag{5.12}$$

**Angenommen**, es gilt  $F_2 \geq 0$ . Dann folgt  $F_1 > F_-$  und außerdem  $F_1 > F_+$ , weil  $F_- \geq F_+ \geq 0$  von Beginn an festgelegt wurde. Das heißt, die Kraft  $F_1$  ist größer als die Reibungskraft  $F_+$ , was der Bedingung  $\dot{x}_0 = 0$  für den in Ruhe bleibenden Massenpunkt 0 widerspricht.

**Angenommen**, es gilt  $F_2 < 0$ . Aus der Bedingung  $\dot{x}_2 = 0$  für den linken Massenpunkt 2 erhält man  $-F_2 < F_+$  oder  $-F_+ < F_2 < 0$ . Damit folgt aus Gleichung (5.12)  $F_1 > F_- - F_+ \geq 0$ , und unter Hinzunahme der Bedingung  $\dot{x}_0 = 0$  für den rechten Massenpunkt 0 folgt  $F_- - F_+ < F_1 < F_+$ , mit  $\frac{1}{2}F_- < F_+ \leq F_-$ .

Damit kann geschlussfolgert werden, dass der betrachtete Fall 3 genau dann realisiert wird, wenn  $F_- - F_+ < F_1 < F_+$  und gleichzeitig  $-F_+ < F_2 < 0$  gelten, mit  $\frac{1}{2}F_- < F_+ \leq F_-$ .

In diesem Fall kann über das kinematische Gait nur ein Ausdruck für die Differenz der Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  gefunden werden:

$$F_1 - F_2 = F_- - m\ddot{l}_2,$$

wobei die Steuergrößen  $l_1(t)$  und  $l_2(t)$  nicht unabhängig voneinander sind, sondern der Bedingung  $\dot{l}_1(t) = -\dot{l}_2(t)$  unterliegen.

### Zusammenfassung:

Abschließend soll erneut unterstrichen werden, dass die oben abgeleiteten Bedingungen nur für den Fall gültig sind, wenn die Bewegung aus der Ruhelage  $\dot{x}_0(0) = \dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = 0$  beginnt. Dann folgen aus  $x_0(t) - x_1(t) = l_1(t)$  und  $x_1(t) - x_2(t) = l_2(t)$  die Bedingungen  $\dot{l}_1(0) = \dot{l}_2(0) = 0$ . Unter dieser Voraussetzung sind die ermittelten Bedingungen in der Formulierung der Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  nicht nur notwendig, sondern auch hinreichend. Mit anderen Worten, wenn (wie in den diskutierten drei Beispielen) der Charakter der Bewegung im Moment unmittelbar auf die Ruhelage folgend gegeben ist, dann müssen zwischen den inneren Kräften  $F_1$  und  $F_2$  (und den Reibkräften) die definierten Bedingungen erfüllt sein. Umgekehrt, wenn zwischen den Kräften  $F_1$  und  $F_2$  die oben genannten Beziehungen bestehen, wird der jeweilige Bewegungscharakter definiert. Nach dem Einsetzen der Beziehungen für  $F_1$  und  $F_2$  in die Bewegungsdifferentialgleichungen der drei diskutierten Fälle können notwendige und hinreichende Bedingungen im Kontext der Größen  $\ddot{l}_1$ ,  $\ddot{l}_2$ ,  $F_1$  und  $F_2$  gewonnen werden. Im vorangegangenen Abschnitt dagegen wurde als Ziel die Formulierung von Bewegungsbedingungen (aus der Ruhelage heraus) im Kontext der  $\dot{l}_1$  und  $\dot{l}_2$  genannt. In diesem Fall ist nur die Angabe hinreichender Bedingungen möglich.

## 5.8 Bewegungsalgorithmen (Gaits)

Es können für den TM-ROBOT Gaits sehr variabel definiert werden, da die beiden Schrittmotoren unabhängig voneinander ansteuerbar sind. Der Input an die Motoren ist durch die Steuerung vom Hersteller mit **Prozenten der maximalen Geschwindigkeit** festgelegt. Damit die Maximal- bzw. Minimalwerte für den Abstand zwischen den Teilmassen  $l_{\max}$  und  $l_{\min}$  nicht über- bzw. unterschritten werden, erfolgt die Vorgabe



der Geschwindigkeiten  $\dot{l}_i$  so, dass pro Periode in jedem Gait die Summe der positiven Schritte betragsmäßig gleich der Summe der negativen Schritte ist.

Als Beispiel dafür sei folgende Form betrachtet:

$$V_i^{\%}(t) = A_i \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + t_i\right), \quad i = 1, 2, \quad 0 \leq A \leq 100, \quad (5.13)$$

$V_i^{\%}(t)$  - Prozent der Maximalgeschwindigkeit der Motoren in jedem Zeittakt,

$T$  - Periode des Gaits,

$t_i$  - Zeitshift zwischen den Antrieben.

• **Beispiel:**

$$\left. \begin{aligned} V_1^{\%}(t) &= 100 \sin\left(\frac{1}{9}\pi t\right) \\ V_2^{\%}(t) &= 60 \sin\left(\frac{1}{9}\pi t + 2\right) \end{aligned} \right\} \quad (5.14)$$

Abbildung 5.14 zeigt eine grafische Darstellung dieses Gaits (aus [Steigenberger04]).

Über das Übersetzungsverhältnis der Spindel und die Schrittmotorfrequenz läßt sich ein Zusammenhang zwischen Prozent der maximalen Geschwindigkeit und Vortrieb er-rechnen.

$$1\%(V_i) = 0,009765 \text{ mm pro } 100 \text{ ms} \quad (5.15)$$

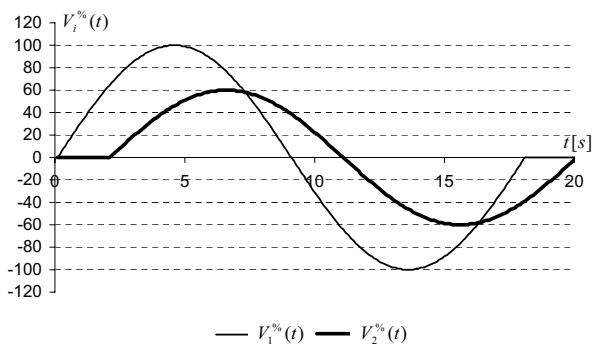


Abbildung 5.14: Steueralgorithmus.

Die Abbildung 5.15 zeigt für die Gaits (5.14) gemäß (5.15) die Umrechnung auf die Geschwindigkeiten  $\dot{l}_1$  und  $\dot{l}_2$ . Schließlich kann aus  $\dot{l}_1(t)$  und  $\dot{l}_2(t)$  die Berechnung der  $\dot{x}_i(t)$  (Abb. 5.16) bzw. der  $x_i(t)$  (Abb. 5.17) und  $l_i(t)$  (Abb. 5.18) erfolgen.

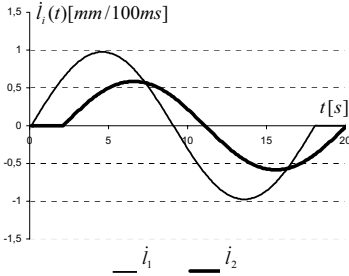


Abbildung 5.15: Geschwindigkeiten von  $l_i(t)$ .

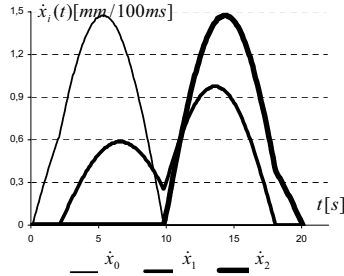


Abbildung 5.16: Geschwindigkeiten der Massepunkte.

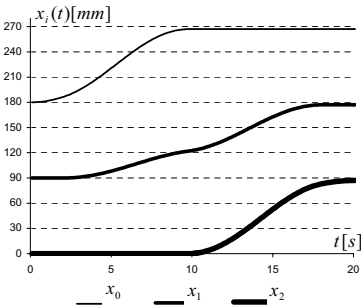


Abbildung 5.17: Verschiebung der Massepunkte.

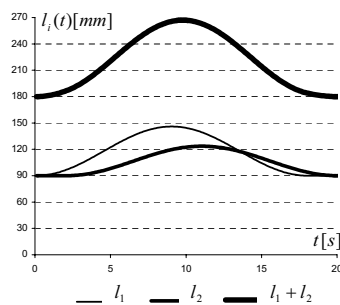


Abbildung 5.18: Längenänderung  $l_i(t)$ .

### 5.9 Steuerung der Elementgeschwindigkeiten des TM-ROBOT mit ausgewählten Gaits

Für eine Reihe von technischen Aufgaben kann es erforderlich sein, dass die einzelnen Elemente des Wurmroboters vorgegebene Geschwindigkeiten  $\dot{x}_i$  realisieren. Wenn zum Beispiel für Inspektionsaufgaben das erste Element mit einer Kamera versehen wird, ist für eine effiziente Auswertung der Aufnahmen die Forderung  $\dot{x}_0 = konst.$  relevant.

In diesem Abschnitt werden solche Gaits dargestellt, die eine konstante Geschwindigkeit der jeweiligen Elemente zur Folge haben.

Zunächst sei noch mal ein Gait betrachtet, das zu nichtkonstanten Massenpunktgeschwindigkeiten führt. Anschließend erfolgt eine sukzessive Korrektur des Gaits zum formulierten Ziel hin (Abbildungen 5.19 bis 5.22).

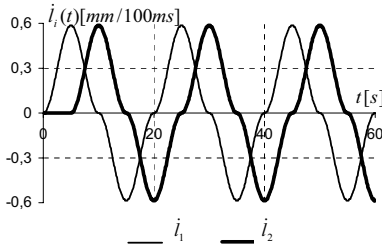


Abbildung 5.19: Funktion  $\dot{l}_i(t)$ .

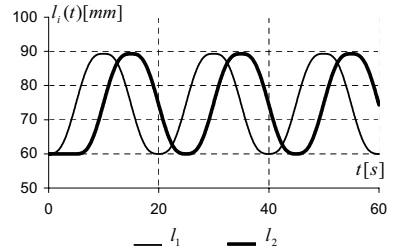


Abbildung 5.20: Funktion  $l_i(t)$ .

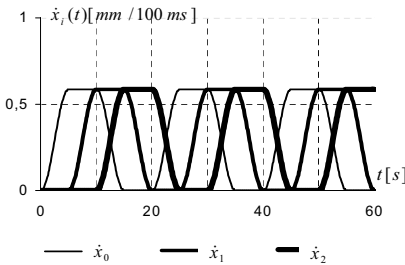


Abbildung 5.21: Funktionen  $\dot{x}_i(t)$ .

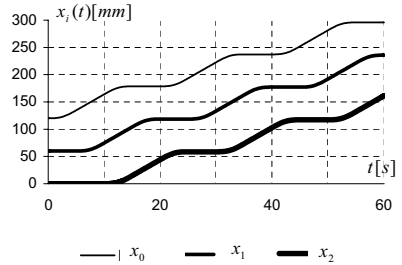


Abbildung 5.22: Bewegungen  $x_i(t)$ .

Die Geschwindigkeit des ersten Massenpunktes  $\dot{x}_0$  ist:

$$\dot{x}_0 = \max\{0, \dot{l}_1, \dot{l}_2\} \quad (\text{siehe Abschnitt 4.1.3}).$$

Um eine konstante Geschwindigkeit der Masse  $x_0$  zu erhalten, muss folglich die nachfolgende Bedingung für jeden Zeitschritt erfüllt sein.

$$\dot{l}_1(t) \Big|_{l_1 > 0, l_2 < 0} = \dot{l}_1(t) + \dot{l}_2(t) \Big|_{l_1 < 0, l_2 > 0}$$

Abbildung 5.23 zeigt das Gait und die Veränderung der Geschwindigkeit gemäß dieser Bedingung.

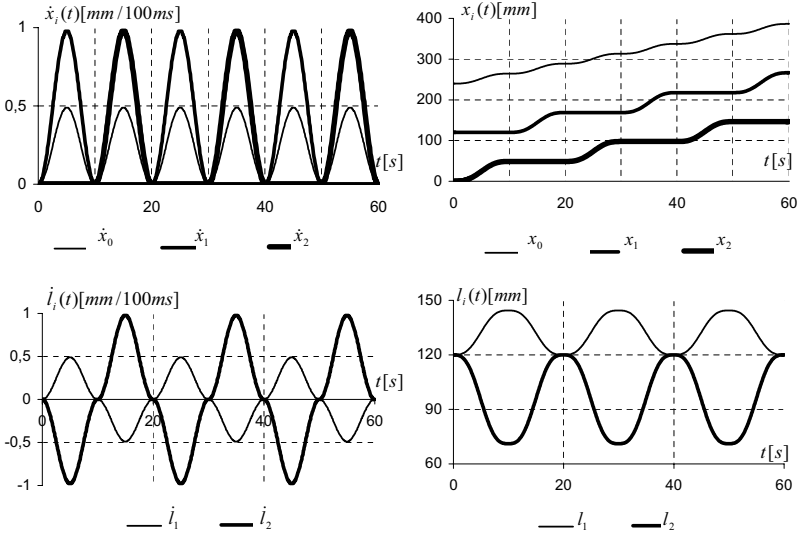


Abbildung 5.23: Kinematische Größen des TM-ROBOT mit dem neuen Gait.

Der Weg-Zeit-Verlauf für die Masse  $x_0$  ist geglättet, allerdings ist die Geschwindigkeit  $\dot{x}_0$  noch nicht konstant. Um dies zu erreichen, wird ein Rechtecksignal anstelle des Sinussignals für die Steuerung benutzt (Abb. 5.24).

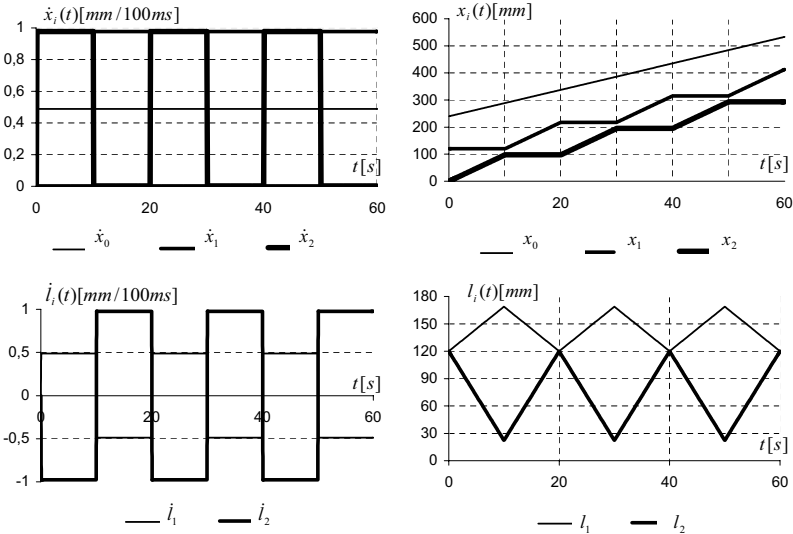


Abbildung 5.24: Geschwindigkeit  $\dot{x}_0$  mit Rechtecksteuersignal.

Die Bedingung, die erfüllt werden sollte, lautet:

$$\dot{i}_1(t)\Big|_{i_1>0, i_2<0} = \dot{i}_1(t) + \dot{i}_2(t)\Big|_{i_1<0, i_2>0} = \text{konstant.}$$

Mit dieser erfüllten Bedingung und der Ansteuerung mit einem Rechtecksignal bewegt sich der erste Massenpunkt  $x_0$  mit konstanter Geschwindigkeit.

Die Massenpunkte mit den Koordinaten  $x_1$  und  $x_2$  zeigen im Weg-Zeit-Verlauf allerdings weiter ein oszillierendes Verhalten mit Stillstandsabschnitten.

Um diesen Effekt zu verringern, wird unter Beachtung der diskreten Ausgabe der Führungsgrößen (Taktzeit=50ms) ein Gait in Form eines Dreiecksignals mit der kürzestmöglichen Periodendauer von 200 ms an den Wurmroboter übergeben (Abb. 5.25).

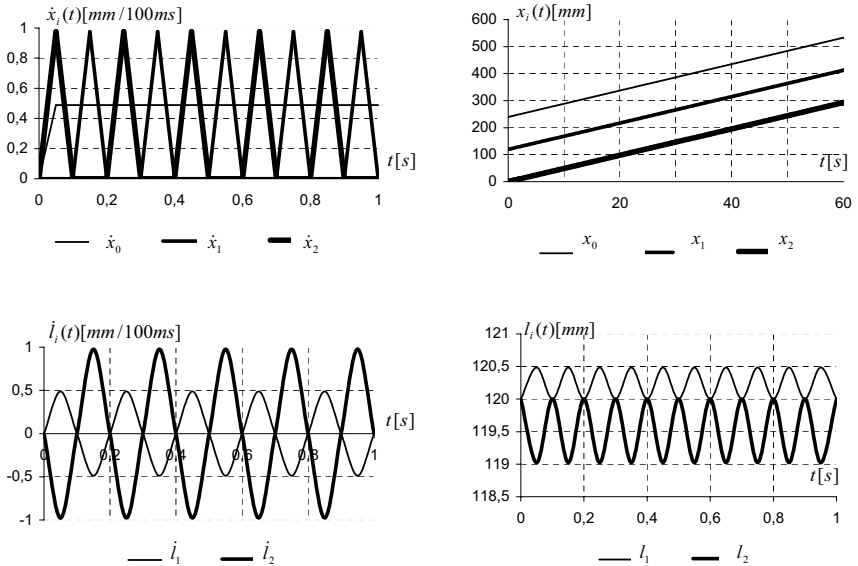


Abbildung 5.25: Geschwindigkeit  $\dot{x}_0$  mit Dreiecksteuersignal.

Die Abbildungen 5.26 und 5.27 zeigen eine Glättung jetzt auch in den Funktionsverläufen für  $x_1(t)$  und  $x_2(t)$ .

Die gleiche Vorgehensweise wird angewendet, um konstante Geschwindigkeiten  $\dot{x}_1$  bzw.  $\dot{x}_2$  zu erhalten. Allerdings gelten hier neue Bedingungen für die  $\dot{i}_i$ :

- für  $\dot{x}_1 = \text{konst.}$  (Abb. 5.26):

$$\dot{i}_1(t) = \dot{i}_2(t) = \text{konstant.}$$

- Für  $\dot{x}_2 = \text{konst.}$  (Abb. 5.27):

$$\dot{i}_2(t) \Big|_{i_1 < 0, i_2 > 0} = \dot{i}_1(t) + \dot{i}_2(t) \Big|_{i_1 > 0, i_2 < 0} = \text{konstant}$$

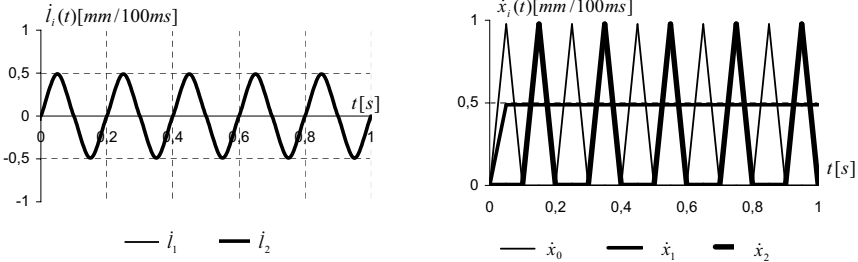


Abbildung 5.26: Geschwindigkeit  $\dot{x}_1$  mit Dreiecksteuersignal.

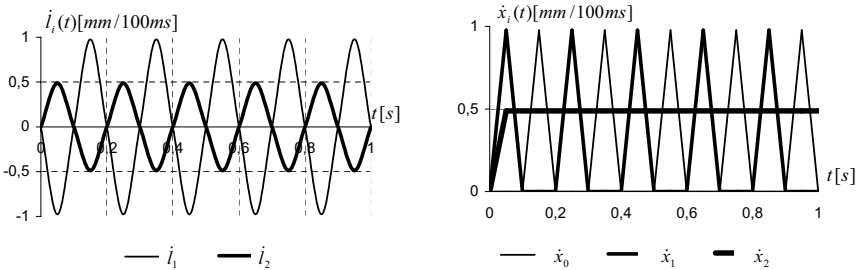


Abbildung 5.27: Geschwindigkeit  $\dot{x}_2$  mit Dreiecksteuersignal.

Mit Blick auf die Untersuchungen des Lokomotionssystems im nachfolgenden Kapitel sei an dieser Stelle folgendes bemerkt. Die Formulierung ausgewählter Gaits zur Realisierung einzelner nahezu konstanter Elementgeschwindigkeiten führte neben der Änderung der Kurvenform des Gaits auch zu einer immer höheren Frequenz in den Verläufen für die  $\dot{i}_i$ . In dem letzten Beispiel wird die hardwareseitig definierte Taktzeit von 50 ms für die Ausgabe der Geschwindigkeiten voll genutzt. Für das Dreieckssignal beträgt die Frequenz somit  $f = 5 \text{ Hz}$ . Eine mit konstanter Geschwindigkeit bewegte Masse wird durch zwei bzgl. der Geschwindigkeit höherfrequent schwingenden Massen „begleitet“. Im nachfolgenden Kapitel werden die hochfrequenten Schwingungen eines Piezoaktuators genutzt, um eine Lokomotion mit passiven Beinen zu realisieren.

## 5.10 Wurmroboter auf geneigter Ebene - Bestimmung des maximalen Steigungswinkels

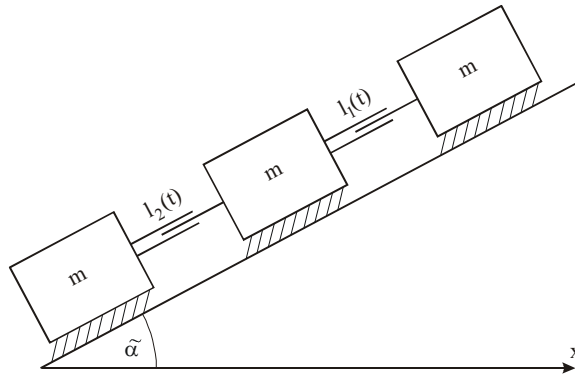


Abbildung 5.28: Wurmroboter beim Hochklettern.

Die Borstenstruktur an der Unterseite der drei Wurmelemente hat, wie bereits geschildert, die Aufgabe, die für eine Lokomotion erforderliche nichtsymmetrische Reibung zu realisieren. Die Rückwärtsbewegung der Massenpunkte wird verhindert, d.h.  $\dot{x}_i \geq 0$ . Mit derartig großen Reibkräften ist auch eine Lokomotion des Systems auf einer geneigten Ebene mit dem Winkel  $\tilde{\alpha}$  möglich. (Abb. 5.28). Dieser Winkel soll nachfolgend für alle kinematischen Steuerungen (Gaits)  $\dot{i}_i$  bestimmt werden. Es wird unterstrichen werden, dass die abgeleiteten Bedingungen nur für den Fall gültig sind, wenn die Bewegung aus der Ruhelage  $\dot{x}_0(0) = \dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = 0$  beginnt. Es ist eine quasistatische Betrachtung. Abbildung 5.29 zeigt diese Vorgehensweise bei der Ermittlung des Steigungswinkels als Funktion von den richtungsabhängigen Reibkoeffizienten  $\mu_-$  und  $\mu_+$ .

### 5.10.1 Lokomotion mit einem bewegten Massenpunkt

Es gibt drei Fälle, bei denen im System nur ein Massenpunkt bewegt wird. Diese Fälle sind den folgenden Gaits zugeordnet.

#### 1. Fall

$$\begin{aligned} \dot{i}_1 &> 0 \\ \dot{i}_2 &= 0 \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \dot{x}_0 > 0, \quad \dot{x}_1 = 0, \quad \dot{x}_2 = 0$$

Aus der Bewegungsdifferentialgleichung für die Masse  $x_0$

$$m\ddot{x}_0 = F_1 - \mu_+ mg \cos \tilde{\alpha} - mg \sin \tilde{\alpha} > 0$$

folgt

$$F_1 > \mu_+ mg \cos \tilde{\alpha} + mg \sin \tilde{\alpha}. \quad (5.16)$$

Damit die Massenpunkte 1 und 2 in Ruhe bleiben, muss die Bedingung

$$F_1 \leq 2\mu_- mg \cos \tilde{\alpha} - 2mg \sin \tilde{\alpha} \quad (5.17)$$

erfüllt sein.

Aus (5.16), (5.17) folgt:

$$(2\mu_- - \mu_+) \cos \tilde{\alpha} > 3 \sin \tilde{\alpha} \Rightarrow \tan \tilde{\alpha} < \frac{2\mu_- - \mu_+}{3}.$$

Der maximale Steigungswinkel beträgt in diesem Fall

$$\tilde{\alpha} < \arctan \frac{2\mu_- - \mu_+}{3}$$

## 2. Fall

$$\begin{aligned} \dot{l}_1 < 0 \\ \dot{l}_2 > 0 \end{aligned}, \text{ und } |\dot{l}_1| = \dot{l}_2 \Rightarrow \dot{x}_0 = 0, \quad \dot{x}_1 > 0, \quad \dot{x}_2 = 0$$

Die Bewegungsdifferentialgleichung für den Massenpunkt 1 lautet

$$m\ddot{x}_1 = F_1 + F_2 - \mu_+ mg \cos \tilde{\alpha} - mg \sin \tilde{\alpha} > 0, \text{ d.h.}$$

$$F_1 + F_2 > \mu_+ mg \cos \tilde{\alpha} + mg \sin \tilde{\alpha}. \quad (5.18)$$

Die Ruhebedingung für die Massen 0 und 2 ergeben

$$F_1 \leq \mu_- mg \cos \tilde{\alpha} - mg \sin \tilde{\alpha}, \quad (5.19)$$

$$F_2 \leq \mu_- mg \cos \tilde{\alpha} - mg \sin \tilde{\alpha}. \quad (5.20)$$



woraus

$$F_1 + F_2 \leq 2\mu_- mg \cos \tilde{\alpha} - 2mg \sin \tilde{\alpha} \quad (5.21)$$

folgt. Mit (5.18), und (5.21) erhält man die Bedingung

$$(2\mu_- - \mu_+) \cos \tilde{\alpha} > 3 \sin \tilde{\alpha} \Rightarrow \tan \tilde{\alpha} < \frac{2\mu_- - \mu_+}{3} \text{ bzw.}$$

$$\tilde{\alpha} < \arctan \frac{2\mu_- - \mu_+}{3}$$



#### Das Inverse Problem

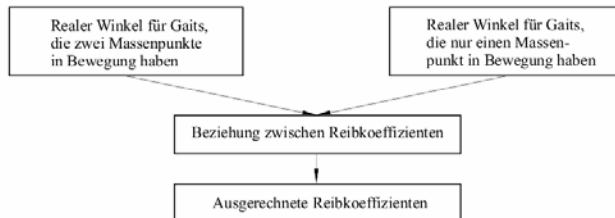


Abbildung 5.29: Bestimmung von  $\tilde{\alpha}$  und Reibkoeffizienten.

**3. Fall**

$$\begin{aligned} \dot{i}_1 &= 0 \\ \dot{i}_2 &< 0 \end{aligned} \Rightarrow \dot{x}_0 = 0, \quad \dot{x}_1 = 0, \quad \dot{x}_2 > 0$$

Analog zu den vorangegangenen Betrachtungen ergibt sich hier die Schlusskette wie folgt:

$$m\ddot{x}_2 = F_2 - \mu_+ mg \cos \tilde{\alpha} - mg \sin \tilde{\alpha} > 0$$

$$F_2 > \mu_+ mg \cos \tilde{\alpha} + mg \sin \tilde{\alpha}. \quad (5.22)$$

Massen 0 und 1 in Ruhe:

$$F_2 \leq 2\mu_- mg \cos \tilde{\alpha} - 2mg \sin \tilde{\alpha} \quad (5.23)$$

$$(2\mu_- - \mu_+) \cos \tilde{\alpha} > 3 \sin \tilde{\alpha} \Rightarrow \tan \tilde{\alpha} < \frac{2\mu_- - \mu_+}{3}$$

Maximaler Steigungswinkel:

$$\tilde{\alpha} < \arctan \frac{2\mu_- - \mu_+}{3}$$

**5.10.2 Lokomotion mit zwei bewegten Massenpunkten**

Für den Fall, dass zwei Massenpunkte in Bewegung sind, erhält man den maximalen Steigungswinkel zum Beispiel aus der Betrachtung des nachfolgenden Gaits.

$$\begin{aligned} \dot{i}_1 &> 0 \\ \dot{i}_2 &< 0 \end{aligned} \Rightarrow \dot{x}_0 > 0, \quad \dot{x}_1 = 0, \quad \dot{x}_2 > 0$$

Aus den Bewegungsdifferentialgleichungen für die Massenpunkte 0 und 2

$$m\ddot{x}_0 = F_1 - \mu_+ mg \cos \tilde{\alpha} - mg \sin \tilde{\alpha} > 0,$$

$$m\ddot{x}_2 = F_2 - \mu_+ mg \cos \tilde{\alpha} - mg \sin \tilde{\alpha} > 0,$$

folgen für die Zwangskräfte

$$F_1 > \mu_+ mg \cos \tilde{\alpha} + mg \sin \tilde{\alpha}, \quad (5.24)$$

$$F_2 > \mu_+ mg \cos \tilde{\alpha} + mg \sin \tilde{\alpha}. \quad (5.25)$$

Die Masse 1 bleibt in Ruhe, d.h.

$$F_1 + F_2 \leq \mu_- mg \cos \tilde{\alpha} - mg \sin \tilde{\alpha}. \quad (5.26)$$

Aus (5.24), (5.25) folgt gleichzeitig

$$F_1 + F_2 > 2\mu_+ mg \cos \tilde{\alpha} + 2mg \sin \tilde{\alpha} \quad (5.27)$$

und somit  $(\mu_- - 2\mu_+) \cos \tilde{\alpha} > 3 \sin \tilde{\alpha} \Rightarrow \tan \tilde{\alpha} < \frac{\mu_- - 2\mu_+}{3}$ .

Der maximale Winkel, den der Wurmroboter in diesem Fall überwinden kann, beträgt

$$\tilde{\alpha} < \arctan \frac{\mu_- - 2\mu_+}{3}$$

### 5.10.3 Das Inverse Problem

Ein wurmartiger Roboter wie der TM-ROBOT kann nicht gleichzeitig alle seine Massenpunkte für seine Bewegung benutzen (siehe Abschnitt 5.6), d.h. es gibt nur zwei Fälle: ein Massenpunkt oder zwei Massenpunkte sind in Bewegung.

Der TM-ROBOT kann, je nach Anzahl der bewegten Massenpunkte (und der Anzahl aktiver/passiver Spikes), verschiedene Steigungswinkel überwinden.

D.h. entweder

$$\tilde{\alpha}_1 < \arctan \frac{\mu_- - 2\mu_+}{3} \quad (\text{zwei Massenpunkte in Bewegung}) \quad (5.28)$$

oder

$$\tilde{\alpha}_2 < \arctan \frac{2\mu_- - \mu_+}{3} \quad (\text{ein Massenpunkt in Bewegung}). \quad (5.29)$$

Im Allgemeinen gilt:

$$\tilde{\alpha} < \arctan \frac{\hat{m}\mu_- - \hat{n}\mu_+}{\hat{m} + \hat{n}} \quad (5.30)$$

mit:

- $\hat{m}$  = Zahl der Massenpunkte, die nicht in Bewegung sind (Spikes aktiv), und
- $\hat{n}$  = Zahl der Massenpunkte, die in Bewegung sind (Spikes passiv).

Aus (5.28) und (5.29) folgt:

$$\begin{cases} \mu_- - 2\mu_+ = 3 \tan \tilde{\alpha}_1 \\ 2\mu_- - \mu_+ = 3 \tan \tilde{\alpha}_2 \end{cases} \quad \text{oder} \quad \begin{cases} \mu_- = 2 \tan \tilde{\alpha}_1 - \tan \tilde{\alpha}_2 \\ \mu_+ = \tan \tilde{\alpha}_1 - 2 \tan \tilde{\alpha}_2 \end{cases} \quad (5.31)$$

Experimentell wurde festgestellt:  $\mu_- = 1,34$ ,  $\mu_+ = 0,62$ ,  $\tilde{\alpha}_1 = 7^\circ$  und  $\tilde{\alpha}_2 = 37^\circ$ .

	experimentelle Werte	berechnete Werte
$\tilde{\alpha}_1$	$7^\circ$	$0,5^\circ$
$\tilde{\alpha}_2$	$37^\circ$	$34,47^\circ$
$\mu_-$	1,34	1,38
$\mu_+$	0,62	0,51

Tabelle 5.3: Vergleich zwischen experimentellen und berechneten Werten.

Aus diesen Messergebnissen und (5.31) können  $\tilde{\alpha}_1$ ,  $\tilde{\alpha}_2$ ,  $\mu_-$  und  $\mu_+$  theoretisch berechnet. Die Tabelle 5.3 vergleicht experimentelle und berechnete Werte.

Der Neigungswinkel  $\tilde{\alpha}_2$  kann durch Addition weiterer Massenpunkte ( $\hat{m} + \hat{n} > 3$ ) erhöht werden

$$\tilde{\alpha}_2 < \lim_{\substack{\hat{m} \rightarrow \infty \\ \hat{n}=1}} \left( \arctan \frac{\hat{m}\mu_- - \hat{n}\mu_+}{\hat{m} + \hat{n}} \right) = \lim_{\hat{m} \rightarrow \infty} \left( \arctan \frac{\hat{m} \left( \mu_- - \frac{\mu_+}{\hat{m}} \right)}{\hat{m} \left( 1 + \frac{1}{\hat{m}} \right)} \right) = \arctan \mu_-$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\tilde{\alpha}_{2\max} < \arctan \mu_-}$$

Abbildung 5.30 zeigt die Erhöhung des Neigungswinkels, wenn die Zahl der Massenpunkte erhöht wird. In diesem Beispiel werden Gaits benutzt, bei denen nur ein Massenpunkt bei jedem Zeitschritt in Bewegung ist.

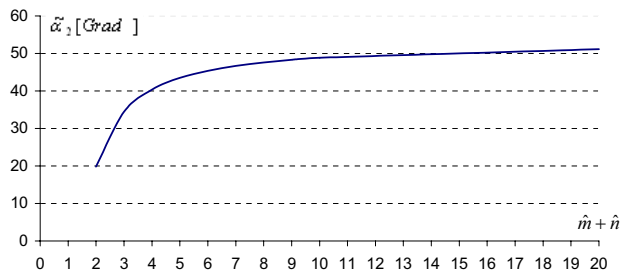


Abbildung 5.30: Erhöhung des Steigungswinkels  $\tilde{\alpha}_2$ .

## 5.11 Wegmessungen am TM-ROBOT

### 5.11.1 Messprinzip (Berührungslose laseroptische Wegmessung)

Um die tatsächlichen Weg-Zeit-Funktionen für die Elemente des Wurmroboters zu ermitteln, wird ein Lasermessgerät (optoNCDT 1605<sup>1</sup>) (Abb. 5.31(a)) in Verbindung mit einem PC-gestützten Auswertesystem (Notebook, PCMCIA-DAQ-Karte, LabView-Software<sup>2</sup>) genutzt. (Abb. 5.31(b,c))

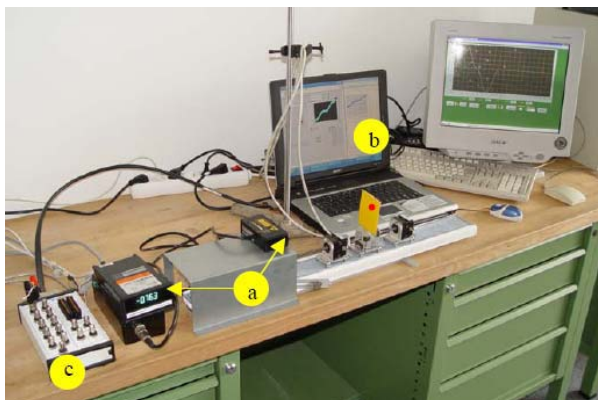


Abbildung 5.31: Messaufbau.

<sup>1</sup> Firma: MICRO-EPSILON

<sup>2</sup> Firma: National Instruments

Das Prinzip der optischen Abstandsmessung mit dem System optoNCDT (optical Non-Contact Displacement Transducer) basiert auf dem Triangulationsverfahren (Abb. 5.32). Eine Laserdiode projiziert einen sichtbaren Lichtpunkt auf die Oberfläche des Messobjektes. Das von diesem Punkt reflektierte Licht wird über eine Empfangsoptik auf ein positionsempfindliches Element (PSD-Element) abgebildet. Verändert der Lichtpunkt seine Position, wird diese Veränderung somit auf das PSD-Sensorelement (Precision Sensitive Detector) abgebildet und ausgewertet. Das PSD-Element liefert eine positionsabhängige analoge Ausgangsspannung, die dem Messweg (Abstand vom Sensor zum Messobjekt) proportional ist (Abb. 5.32). Die Messung erfolgt berührungslos und somit verschleißfrei gegen verschiedenste Messobjektflächen.

Das Messsystem optoNCDT 1605 (Abb. 5.33) besteht aus dem Controller und dem laseroptischen Triangulationssensor, die mit einem integrierten Sensorkabel verbunden werden.

Die bereits erwähnte diffuse Reflexion ist Voraussetzung für die einwandfreie Funktion des Triangulationsprinzips. Die notwendige Lichtintensität wird dem Reflexionsfaktor des Messobjektes automatisch angepasst. Optimale Messergebnisse setzen ein rechtwinkliges Auftreffen des Laserstrahls auf die Messobjektfläche voraus. Bei Verkippung unterliegt die Messung einer Winkelabhängigkeit. Sie ist bei matten Flächen mit diffuser Reflexion geringer als bei spiegelnden Oberflächen.

Die Messwerte werden mittels einer DAQ-Karte (Data Acquisition card) und LabVIEW erfasst und bearbeitet.

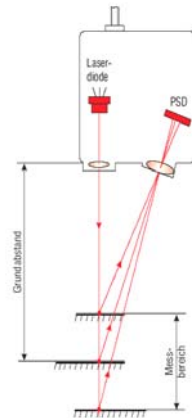


Abbildung 5.32: Triangulationsmessprinzip.

### 5.11.2 Messungen am TM-ROBOT und Auswertung

Zur Erhöhung der Genauigkeit erfolgte eine separate Messung der von Wurmelementen zurückgelegten Wege. Die Abtastung durch den Laser erfolgte mit einer Rate von 3000 Messungen pro Sekunde. Die Messergebnisse wurden für jede Messung gefiltert. Aus drei Messungen erfolgte anschließend eine Mittelwertbildung (Abb. 5.35, Abb. 5.36).



Abbildung 5.33: Messsystem mit LD 1605 Sensor und Controller.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Messwerte für das folgende Gait (siehe dazu auch [Steigenberger 04, 05]):

$$\dot{i}_1(\tau) = h\left(0, \frac{1}{6}, \tau\right) - h\left(\frac{2}{6}, \frac{4}{6}, \tau\right) + h\left(\frac{4}{6}, \frac{5}{6}, \tau\right),$$

$$\dot{i}_2(\tau) = -\dot{i}_1(1 - \tau),$$

$$\tau = \omega t.$$

mit

$$\tau \mapsto h(a, b, \tau) := \begin{cases} 1, & \tau \in [a, b] \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Die Abbildung 5.34 (oben) zeigt  $\dot{i}_1(\tau)$  bzw.  $\dot{i}_2(\tau)$ . Für die Steuerung werden sie mittels  $\sin^2(\cdot)$  geglättet (Abb. 5.34 (unten)).

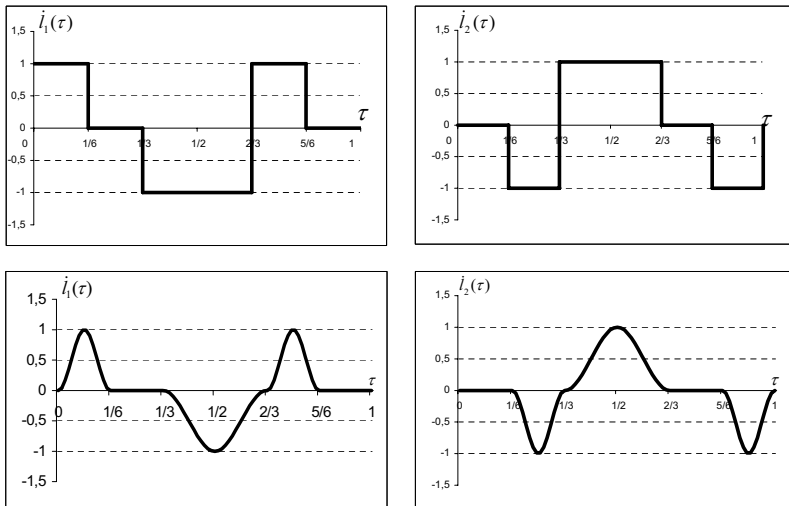


Abbildung 5.34:  $\dot{i}_1(\tau)$  und  $\dot{i}_2(\tau)$  des Steuer-Gaits.

Dargestellt sind die Koordinaten  $x_0(t)$  des ersten Elements.

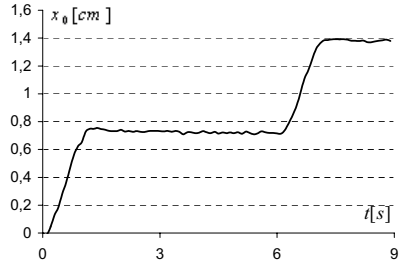
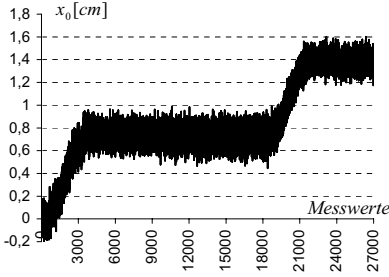


Abbildung 5.35: Messung (links) und gefilterte Messung (rechts) von  $x_0$ .

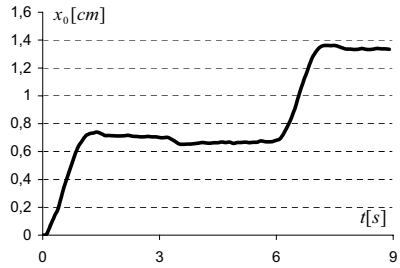
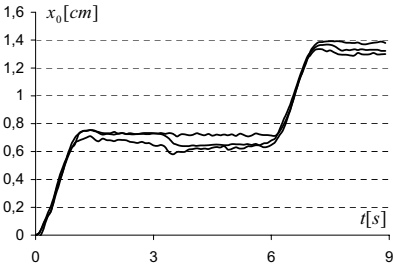


Abbildung 5.36: Mehrere Wegmessungen (links) und der Mittelwert (rechts).

Das Ergebnis der Messungen der Bewegung aller drei Elemente sowie eine Vergleich mit den theoretischen Resultaten aus der Kinematik des Systems (Kapitel 4) zeigt die Abbildung 5.37.

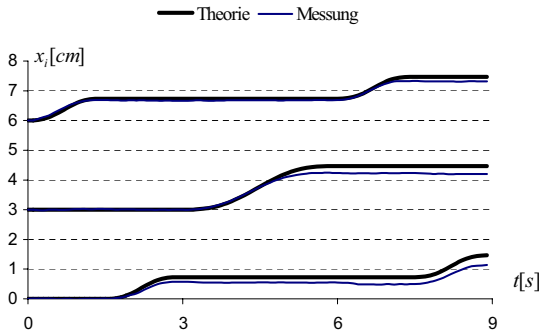


Abbildung 5.37: Vergleich zwischen Theorie und Messergebnisse.



Quantitativ bemessen beträgt der Unterschied zwischen Theorie und Experiment etwa 15 %. Die Gründe dafür lauten:

1. Die aus der Kinematik gewonnenen Ergebnisse werden trotz geringer Geschwindigkeiten der Elemente von Trägheitseffekten beeinflusst
2. Die „idealen“ kinematischen Zwangsbedingungen (4.5)  $\dot{x}_i > 0$  werden über die Spikes nicht vollständig umgesetzt. Im Experiment sind kurzzeitig negative Geschwindigkeiten zu beobachten.
3. Das Messsystem besitzt zwar eine sehr hohe Genauigkeit, unterliegt dabei aber stark Umgebungseinflüssen und führte somit zu starkem Rauschen in den Messergebnissen.

Die Nutzung eines besseren Messsystems, welches das Rauschen reduzieren bzw. eliminieren kann, führt zu verbesserten Ergebnissen. Die Nutzung von Rädern, die mittels eines auf die Welle wirkenden Reibdaumens negative Geschwindigkeiten verhindern, kann die genannten Probleme lösen [Steigenberger05] (Abb. 5.38).

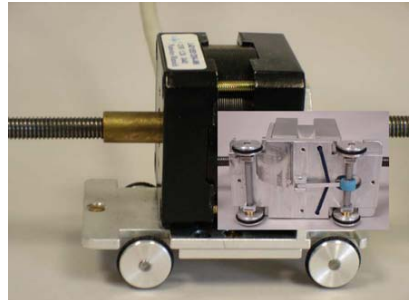


Abbildung 5.38: Element des TM-ROBOT mit Rädern und Reibdaumen.



## 6. Kapitel

# Piezobasiertes Lokomotionssystem MINCH-ROBOT

### 6.1 Einführende Bemerkungen und Motivation

Der im vorangegangenen Kapitel 5 vorgestellte Prototyp TM-ROBOT diente, wie die Ausführungen zeigen sollten, wesentlich der Überprüfung von Ergebnisse der Grundlagenforschung zu Mechanik und Steuerung wurmartiger Lokomotionssysteme, basierend auf einem **Starrkörpermodell**. Die Entwicklung seiner Hard- und Software war somit nicht auf unmittelbare Applikationen, sondern auf einen methodischen und erkenntnistheoretischen Aspekt orientiert.

Mit dem Lokomotionssystem MINCH-ROBOT wurde dieser methodische Aspekt erweitert und ein in seiner Funktionsweise von **deformierbaren Körpern** bestimmtes System entwickelt. Der mobile Roboter nutzt, wie andere Mikroroboterentwicklungen auch (siehe [Lobontiu98], [Weise02]) einen Piezoaktuator. Unter den Antriebssystemen haben sich Piezoaktuatoren als besonders effektiv erwiesen, da ein Piezoaktuator mehr als 90% der elektrischen Energie in mechanische Energie umwandeln kann.

Im System MINCH-ROBOT [Minchenija05] wurde ein Bimorph-Biegewandler als Basis für den Aufbau eines Mikroroboters, der drei Kontaktpunkte mit dem Boden besitzt, ausgewählt (Abb. 6.1).

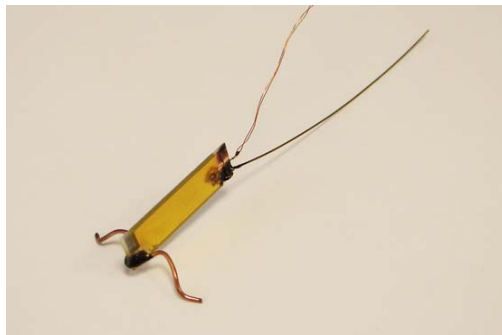


Abbildung 6.1: Der Mikroroboter MINCH-ROBOT.

Die drei Kontaktpunkte sind durch zwei passive Beine und einen flexiblen Schwanz realisiert. „Passiv“ soll hier bedeuten, dass es sich nicht im eigentlichen (biologischen) Sinne um Beine mit Gelenken und Antrieben in diesen Gelenken handelt. Der Piezoaktuator bildet sowohl das Antriebelement als auch gleichzeitig den Grundkörper des Roboters. Somit hat das mobile System nur eine Masse von 1,7 Gramm und ist 45 Millimeter lang (inklusive Schwanz).

## 6.2 Bewegungs- und Steuerungsprinzip

Die Lokomotion basiert auf der Auskopplung der Transversalschwingungen des Piezoaktuators über die Beine. Diese wiederum werden durch die Ankopplung am Vorderende des Aktuators zu Longitudinal- und Transversalschwingungen angeregt.

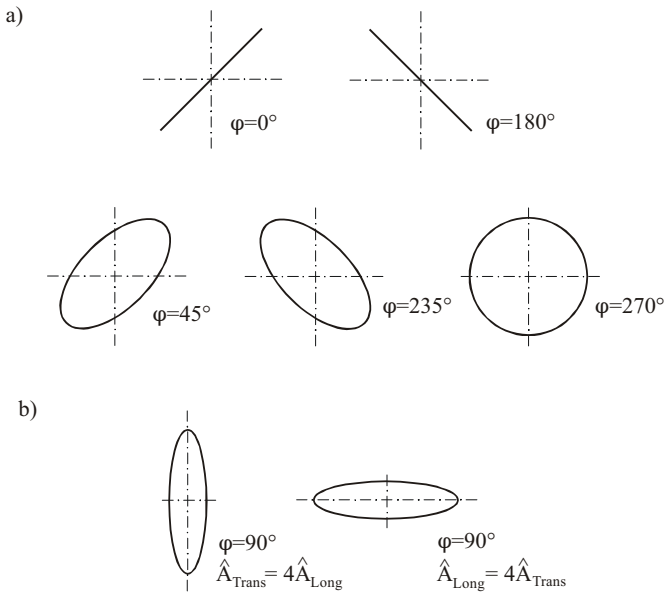


Abbildung 6.2: Trajektorien der Beinendpunkte in Abhängigkeit des Amplitudenverhältnisses  $\hat{A}_{Trans} / \hat{A}_{Long}$  und der Phasendifferenz  $\varphi$  (aus [Minchenija05]).

Diese Überlagerung der Eigenformen unterschiedlicher Schwingungen führt zur Entstehung von komplexen räumlichen Trajektorien der Beinendpunkte, die abhängig von der Beingeometrie und der Frequenz des Aktuators unterschiedliche Formen besitzen.

Die Abbildung 6.2 zeigt die auf die Ebene parallel zur Piezoebene projizierten theoretischen Bahnkurven des Beinendpunktes bei unterschiedlichen Amplitudenverhältnissen  $\hat{A}_{Trans} / \hat{A}_{Long}$  und Phasendifferenzen  $\varphi$  zwischen Longitudinal- und Transversalschwingungen.

Die Form der Trajektorien hängt, wie die FEM-Berechnungen im nachfolgenden Abschnitt 6.2 bestätigen, wesentlich vom Verhältnis zwischen den Amplituden der Longitudinal- und Transversalschwingungen der Beine ab. Diese Relation wiederum kann durch Steuerung der Piezofrequenz geändert werden. Beim Zusammenfallen der Amplituden von Longitudinal- und Transversalschwingungen  $\hat{A}_{Trans} = \hat{A}_{Long}$  der Beine entstehen die Bahnverläufe wie in Abbildung 6.2.a). Wenn die Amplituden nicht zusammenfallen, dann nimmt die Bahn die Form gemäß Abbildung 6.2.b) an. Über die Steuerung der Frequenz des Piezoaktuators werden unterschiedliche Harmonische der Longitudinal- und Transversalschwingungen der Beine angeregt, was wiederum zu (experimentell bestätigten, siehe Abschnitt 6.5) unterschiedlichen Trajektorien der Beinendpunkte auf der Auflagefläche führt. Im Gegensatz zu den theoretisch ermittelten spielen bei den in der Praxis beobachteten tatsächlichen Bahnkurven noch Stoßvorgänge aus der Wechselwirkung Bein-Auflagefläche eine Rolle. Die Beinendpunkte „springen“ aufgrund der hohen Geschwindigkeiten nach dem Kontakt von der Oberfläche weg (Periodisches Stoß-Regime, Abb. 6.3). Dies ist ein Effekt der im Zusammenhang mit der Geschwindigkeit des MINCH-ROBOT noch genauer beschrieben wird.

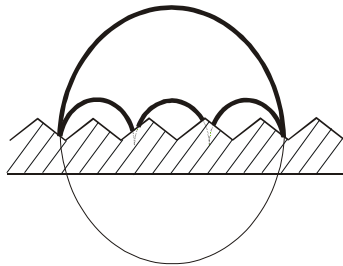


Abbildung 6.3: Tatsächliche Trajektorien der Beinendpunkte.

Für die Steuerung der Bewegungsrichtung wird die (absichtlich realisierte) Nichtsymmetrie der beiden Beine genutzt. Diese Nichtsymmetrie zwischen rechtem und linkem Bein ist die Ursache für eine Verschiebung der Resonanzbereiche der Beine. Damit wird der Roboter in seiner Richtung steuerbar. In der Abbildung 6.4 wird das Steuerprinzip erklärt.

Um den Roboter nach rechts zu bewegen, müssen die Eigenformen über den Piezoaktuator angeregt werden, die zu einer größeren Amplitude der Transversalschwingung des linken Beines im Vergleich zum rechten Bein führen. Das gleiche gilt für die Bewegung des Roboters nach links, wo die Frequenzen, die die Amplitude des rechten Beines größer als die Amplitude des linken Beines machen, benutzt werden.

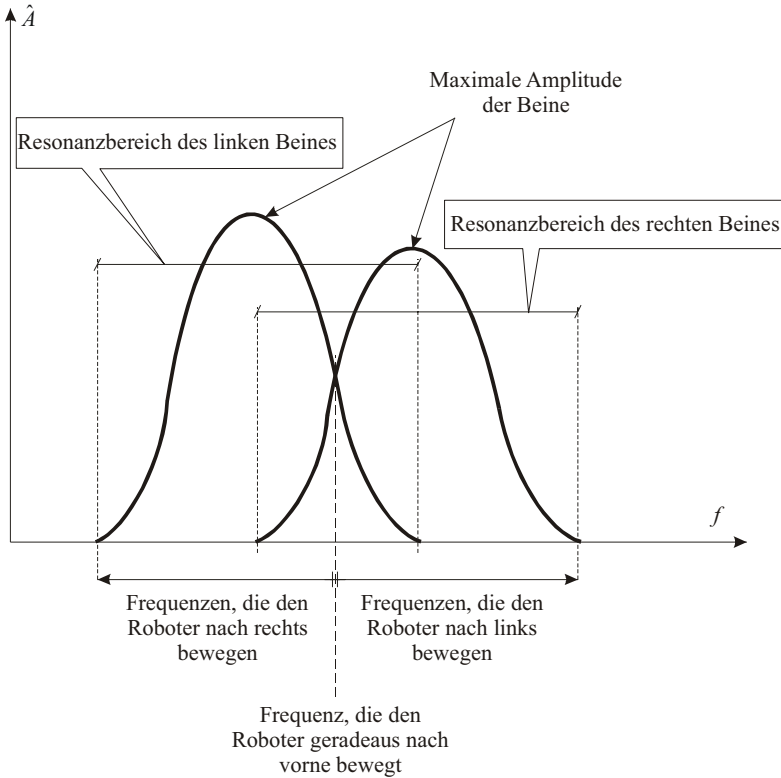


Abbildung 6.4: Richtungssteuerung des MINCH-ROBOT.

Über die Frequenz, die zu gleichen Amplituden der Beine führt, wird die Geradeausbewegung des Roboters realisiert.

### 6.3 Finite-Elemente-Modell des MINCH-ROBOT

Die Finite-Elemente-Methode als eines der dominierenden rechnergestützten Verfahren in der Ingenieurarbeit neben der Mehrkörperdynamiksimulation bietet die effiziente Möglichkeit der Modalanalyse für den MINCH-ROBOT. Das im Programm ANSYS<sup>1</sup> implementierte FE-Modell wurde somit zunächst zur Ermittlung der Eigenformen bzw. Eigenfrequenzen (Abb. 6.5) genutzt.

<sup>1</sup> Firma: ANSYS, Inc.

Die Abbildung 6.6 zeigt ausgewählte Transversal- und Longitudinalschwingungseigenformen mit den dazugehörigen Eigenfrequenzen des Modells, bestehend aus dem Grundkörper (Piezoelement) und zwei Beinen. Auf das 4. Element, den für die Stabilität der Bewegung wesentlichen Schwanz, wurde bei der Modalanalyse verzichtet. Als Systemparameter wurden die Materialkennwerte von Stahl  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ ,  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$  und  $\nu = 0,3$  verwendet. Die Maße des Grundkörpers sind  $L = 25 \text{ mm}$  (Länge),  $h = 8 \text{ mm}$  (Höhe) und  $b = 0,9 \text{ mm}$  (Breite).

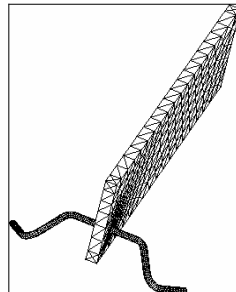


Abbildung 6.5: FEM-Modell des MINCH-ROBOT.

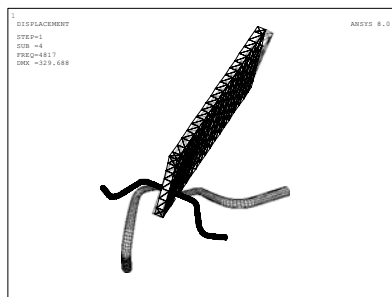
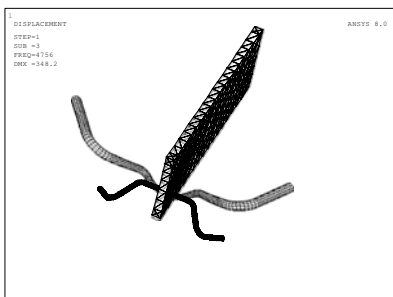
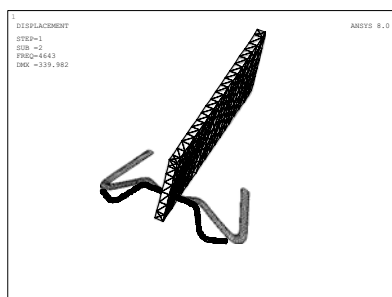
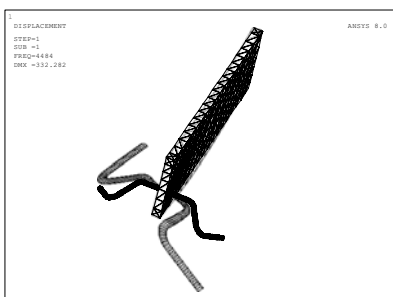


Abbildung 6.6: Ausgewählte Eigenformen des MINCH-ROBOT.

Die Abbildung 6.7 zeigt Screenshots aus der FE-Simulation der Bewegung des MINCH-ROBOT bei einer ausgewählten Eigenfrequenz. Der Untersuchungsschwerpunkt lag bei der Ermittlung der Trajektorie der Beinendpunkte. Die Simulation zeigte eine gute qualitative Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Abschnitt 6.5 und theoretischen Aussagen aus dem Abschnitt 6.2 zum Funktionsprinzip des Roboters. Somit kann die Simulation genutzt werden, um die Form der Beine für eine effiziente Fortbewegung zu optimieren.

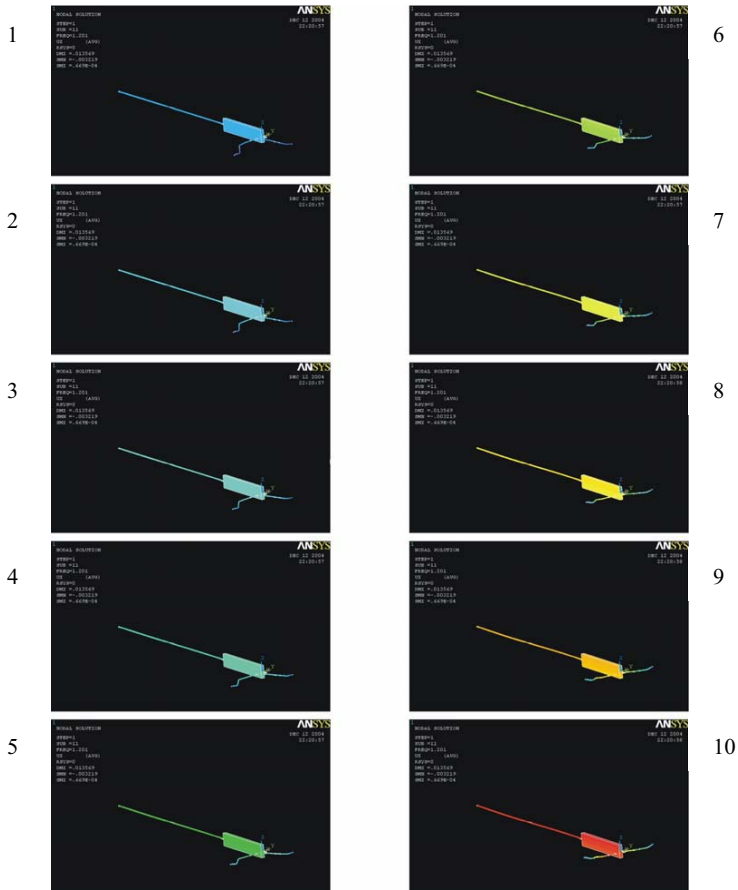


Abbildung 6.7: Simulation der Beinbewegung des MINCH-ROBOT.

## 6.4 Massenpunktsystem-Modell des MINCH-ROBOT

### 6.4.1 Modell und Ableitung der Bewegungsdifferentialgleichungen

Für die undulatorische Lokomotion des MINCH-ROBOT erweisen sich

- nichtsymmetrische Kontaktkräfte zur Unterlage und
- periodische Deformationen des Piezogrundkörpers (bzw. periodische Kräfte durch den Piezoaktuator)



als funktionsbestimmend. Eine sehr realitätsnahe Modellbildung und Simulation in Form eines FE-Modells kann Aussagen über die Bewegung liefern und einen optimalen Systemwurf ermöglichen (siehe Abschnitt 6.3). Es soll an dieser Stelle gezeigt werden, dass bereits auch auf einer viel höheren Abstraktionsstufe mit einem Massenpunktsystem-Modell wesentliche Phänomene bei der Bewegung des MINCH-ROBOT realitätsnah untersucht werden können. Wie sich zeigt, ist eine messtechnische Verifizierung des Modell, welches in seiner Grobstruktur dem MINCH-ROBOT entspricht, möglich. Anstelle der Kräfte des Piezoaktuators wird eine periodische äußere eingeprägte Kraft  $\vec{F}_D$  angenommen. Das Modell besteht aus drei Massenpunkten A, B, D die durch masselose Stäbe miteinander verbunden sind (Abb. 6.8).  $\vec{E}_x$  und  $\vec{E}_y$  sind körperfeste,  $\vec{e}_x$  bzw.  $\vec{e}_y$  raumfeste Einheitsvektoren. Die Punkte A und B tragen die Masse  $M$ , der Punkt D die Masse  $m$ . Der Schwerpunkt des Systems sei mit S bezeichnet und durch die Länge  $a$  bestimmt. Die geometrischen Abmessungen seien mit  $\alpha$ ,  $l$  und  $L$  gegeben.

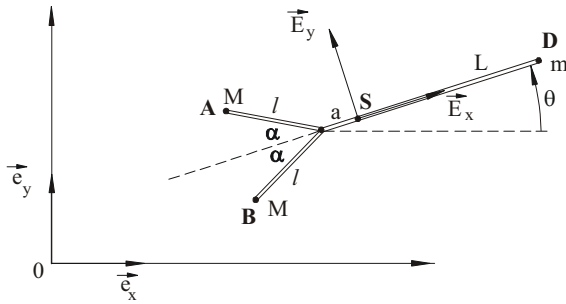


Abbildung 6.8: Massenpunktsystem-Modell des MINCH-ROBOT.

Das Bewegungsprinzip des Roboters betrachtend werden in den Punkten A und B periodische Normalkräfte  $\vec{N}_A$  und  $\vec{N}_B$  angenommen. Diese führen im Zusammenhang mit dem Reibkoeffizienten  $\mu$  zu COULOMBSchen Reibkräften  $\vec{F}_{R_A}$  und  $\vec{F}_{R_B}$ . Der Antrieb erfolgt durch eine periodische Kraft  $\vec{F}_D = \hat{F}_D \sin \omega t \vec{E}_x$  im Punkt D (Abb. 6.9).

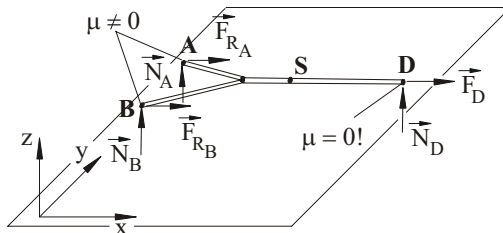


Abbildung 6.9: Kräfte am Modell.

Die Untersuchungen werden auf die Bewegung in der x-y-Ebene, d.h. die Punkte A,B und D haben stets Kontakt zur Unterlage ( $N_A \geq 0$ ,  $N_B \geq 0$ ,  $N_D \geq 0$ ). Eine Dynamik in z-Richtung wird nicht betrachtet. Mit Hilfe des Impuls- und Drehimpulssatzes werden die Bewegungsdifferentialgleichungen für die kartesischen Koordinaten des Schwerpunktes  $x_S$  und  $y_S$  sowie für die Orientierung  $\theta$  des Systems ermittelt.

Zunächst wird die Lage des Schwerpunktes (d.h. die Länge a, Abb. 6.10) bestimmt.

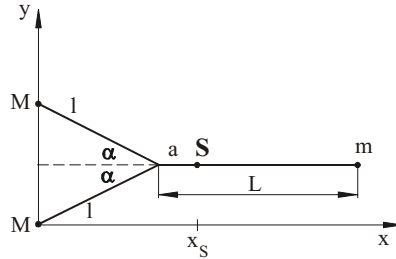


Abbildung 6.10: Bestimmung der Schwerpunktlage.

Gemäß der Schwerpunktformel  $x_s = \frac{\sum_i x_i m_i}{\sum_i m_i}$  folgt aus Abb. 6.10  $x_s = \frac{(l \cos \alpha + L) m}{2M + m}$ .

Über die Beziehung  $x_s = l \cos \alpha + a$  erhält man

$$a = \frac{(l \cos \alpha + L) m - (2M + m) l \cos \alpha}{2M + m} \text{ bzw. endgültig}$$

$$a = \frac{Lm - 2Ml \cos \alpha}{2M + m}.$$

Der Impulssatz für das Massenpunktsystem lautet

$$m_s \ddot{\vec{r}}_s = \sum \vec{F}_i^{(e)} + \sum \vec{F}_i^z$$

mit  $m_s = 2M + m$  und  $\ddot{\vec{r}}_s = \ddot{x}_s \vec{e}_x + \ddot{y}_s \vec{e}_y$ . Die Summen der eingepprägten Kräfte und der Zwangskräfte haben die Form

$$\sum \vec{F}_i^{(e)} = \vec{F}_{R_A} + \vec{F}_{R_B} + \vec{F}_D + 2M \vec{g} + m \vec{g}$$

$$\sum \vec{F}_i^z = \vec{N}_A + \vec{N}_B + \vec{N}_D$$

Für die Reibkräfte  $\vec{F}_{R_A} = -\mu |\vec{N}_A| \frac{\vec{v}_A}{|\vec{v}_A|}$  und  $\vec{F}_{R_B} = -\mu |\vec{N}_B| \frac{\vec{v}_B}{|\vec{v}_B|}$  ist die Bestimmung der Geschwindigkeiten der Massenpunkte A und B erforderlich. Aus der Kinematik des Systems erhält man die Beziehungen

$$\begin{aligned}\vec{r}_A &= \vec{r}_s + \vec{SA} = \vec{r}_s + (-a l \cos \alpha \vec{E}_x + l \sin \alpha \vec{E}_y) \\ \vec{r}_A &= x_s \vec{e}_x + y_s \vec{e}_y + (-(a + l \cos \alpha)(\cos \theta \vec{e}_x + \sin \theta \vec{e}_y) + l \sin \alpha (-\sin \theta \vec{e}_x + \cos \theta \vec{e}_y)),\end{aligned}$$

woraus für die Koordinaten von Lage und Geschwindigkeiten folgt

$$\left. \begin{aligned}x_A &= x_s - (a + l \cos \alpha) \cos \theta - l \sin \alpha \sin \theta \\ y_A &= y_s - (a + l \cos \alpha) \sin \theta + l \sin \alpha \cos \theta \\ \dot{x}_A &= \dot{x}_s + a \sin \theta \dot{\theta} + l \sin(\theta - \alpha) \dot{\theta} \\ \dot{y}_A &= \dot{y}_s - a \cos \theta \dot{\theta} - l \cos(\theta - \alpha) \dot{\theta}\end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Zusammen mit dem Betrag der Geschwindigkeit  $|\vec{v}_A| = \sqrt{(\dot{x}_A)^2 + (\dot{y}_A)^2}$  ist die Reibkraft  $\vec{F}_{R_A}$  bestimmt.

Analog erhält man für die Bestimmung von  $\vec{F}_{R_B}$ :

$$\begin{aligned}\vec{r}_B &= \vec{r}_s + \vec{SB} = \vec{r}_s + (-(a + l \cos \alpha) \vec{E}_x - l \sin \alpha \vec{E}_y) \\ \vec{r}_B &= x_s \vec{e}_x + y_s \vec{e}_y + (-(a + l \cos \alpha)(\cos \theta \vec{e}_x + \sin \theta \vec{e}_y) - l \sin \alpha (-\sin \theta \vec{e}_x + \cos \theta \vec{e}_y)) \\ x_B &= x_s - (a + l \cos \alpha) \cos \theta + l \sin \alpha \sin \theta \\ y_B &= y_s - (a + l \cos \alpha) \sin \theta - l \sin \alpha \cos \theta \\ \dot{x}_B &= \dot{x}_s + a \sin \theta \dot{\theta} + l \sin(\theta + \alpha) \dot{\theta} \\ \dot{y}_B &= \dot{y}_s - a \cos \theta \dot{\theta} - l \cos(\theta + \alpha) \dot{\theta}\end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

$$|\vec{v}_B| = \sqrt{(\dot{x}_B)^2 + (\dot{y}_B)^2}$$

Im Sinne der eingangs gemachten Bemerkungen zum Funktionsprinzip des MINCH-ROBOT werden für die Normalkräfte folgende Annahmen getroffen:

$$N_A = Mg + A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

$$N_B = Mg + B \sin(\omega t + \psi_0),$$

$$N_D = mg.$$

Da für die Normalkräfte wie oben angeführt  $N_A \geq 0$ ,  $N_B \geq 0$ ,  $N_D \geq 0$  gilt, folgen für die Konstanten A und B die Forderungen  $A \leq Mg$  bzw.  $B \leq Mg$ . Bei den nachfolgenden Simulationsrechnungen im Abschnitt 6.4.2 wird  $A = B = Mg$  angenommen und die Bedingungen werden somit erfüllt. Damit folgen die zwei skalaren Gleichungen aus dem Impulssatz

$$(2M + m) \ddot{x}_s = -\mu |\bar{N}_A| \cdot \frac{\dot{x}_A}{|\bar{v}_A|} - \mu |\bar{N}_B| \cdot \frac{\dot{x}_B}{|\bar{v}_B|} + \hat{F}_D \sin \omega t \cos \theta, \quad (6.3)$$

$$(2M + m) \ddot{y}_s = -\mu |\bar{N}_A| \cdot \frac{\dot{y}_A}{|\bar{v}_A|} - \mu |\bar{N}_B| \cdot \frac{\dot{y}_B}{|\bar{v}_B|} + \hat{F}_D \sin \omega t \sin \theta. \quad (6.4)$$

Der Drehimpulssatz wird bezogen auf den Schwerpunkt S in der Form  $\dot{\bar{D}}_s = \bar{M}_s$  aufgestellt.

Das Massenträgheitsmoment  $J$  für den Drall folgt mit

$$J = M \cdot |\overline{AS}|^2 + M \cdot |\overline{BS}|^2 + m(L - a)^2 \quad \text{und} \quad |\overline{AS}|^2 = |\overline{BS}|^2 = a^2 + l^2 - 2al \cos(\pi - \alpha) \quad \text{zu}$$

$$J = 2M(a^2 + l^2 - 2al \cos(\pi - \alpha)) + m(L - a)^2.$$

Damit gilt für den Drall  $\bar{D}_s = J \dot{\theta} \bar{E}_z$ .

Die rechte Seite des Drehimpulssatzes lautet

$$\bar{M}_s = \overline{SA} \times \bar{F}_{R_A} + \overline{SB} \times \bar{F}_{R_B}.$$

Zur Berechnung der Momente werden körperfeste Koordinaten verwendet.

$$\overline{SA} = -(a + l \cos \alpha) \bar{E}_x + l \sin \alpha \bar{E}_y \quad \text{und} \quad \bar{F}_{R_A} = -\mu |\bar{N}_A| \cdot \frac{\dot{x}_A \bar{e}_x + \dot{y}_A \bar{e}_y}{|\bar{v}_A|},$$

$$\bar{e}_x = \cos \theta \bar{E}_x - \sin \theta \bar{E}_y,$$

$$\bar{e}_y = \sin \theta \bar{E}_x + \cos \theta \bar{E}_y.$$

Für das erste Moment erhält man somit

$$\begin{aligned} \overline{SA} \times \bar{F}_{R_A} = & -(a + l \cos \alpha) \bar{E}_x + \\ & l \sin \alpha \bar{E}_y \cdot x \left[ -\mu |\bar{N}_A| \cdot \left\{ \left( \frac{\dot{x}_A}{|\bar{v}_A|} \cos \theta + \frac{\dot{y}_A}{|\bar{v}_A|} \sin \theta \right) \bar{E}_x + \left( \frac{\dot{x}_A}{|\bar{v}_A|} (-\sin \theta) + \frac{\dot{y}_A}{|\bar{v}_A|} \cos \theta \right) \bar{E}_y \right\} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= (a + l \cos \alpha) \cdot \mu \cdot |\vec{N}_A| \cdot \left( \frac{\dot{x}_A}{|\vec{v}_A|} (-\sin \theta) + \frac{\dot{y}_A}{|\vec{v}_A|} \cos \theta \right) \cdot \vec{E}_z + \\
&(l \sin \alpha) \cdot \mu \cdot |\vec{N}_A| \cdot \left( \frac{\dot{x}_A}{|\vec{v}_A|} \cos \theta + \frac{\dot{y}_A}{|\vec{v}_A|} \sin \theta \right) \cdot \vec{E}_z.
\end{aligned}$$

Die analoge Rechnung für das zweite Moment lautet wie folgt:

$$\begin{aligned}
\overline{SB} &= -(a + l \cos \alpha) \vec{E}_x - l \sin \alpha \vec{E}_y \\
\vec{F}_{R_B} &= \mu |\vec{N}_B| \cdot \frac{\dot{x}_B \vec{e}_x + \dot{y}_B \vec{e}_y}{|\vec{v}_B|} \\
\overline{SB} \times \vec{F}_{R_B} &= \left( -(a + l \cos \alpha) \vec{E}_x - l \sin \alpha \vec{E}_y \right) \times \\
&\left[ -\mu |\vec{N}_B| \left\{ \left( \frac{\dot{x}_B}{|\vec{v}_B|} \cos \theta + \frac{\dot{y}_B}{|\vec{v}_B|} \sin \theta \right) \vec{E}_x + \left( \frac{\dot{x}_B}{|\vec{v}_B|} (-\sin \theta) + \frac{\dot{y}_B}{|\vec{v}_B|} \cos \theta \right) \vec{E}_y \right\} \right] \\
&= +(a + l \cos \alpha) \mu \frac{|\vec{N}_B|}{|\vec{v}_B|} \cdot (\dot{x}_B (-\sin \theta) + \dot{y}_B \cos \theta) \vec{E}_z + \\
&- l \sin \alpha \mu \frac{|\vec{N}_B|}{|\vec{v}_B|} \cdot (\dot{x}_B \cos \theta + \dot{y}_B \sin \theta) \vec{E}_z.
\end{aligned}$$

Damit erhält man als dritte Bewegungsdifferentialgleichung aus dem Drehimpulssatz

$$\left. \begin{aligned}
&(2M(a^2 + l^2 - 2al \cos(\pi - \alpha)) + m(L - a)^2) \ddot{\theta} = \\
&(a + l \cos \alpha) \mu \frac{|\vec{N}_A|}{|\vec{v}_A|} (-\dot{x}_A \sin \theta + \dot{y}_A \cos \theta) + \\
&l \sin \alpha \mu \frac{|\vec{N}_A|}{|\vec{v}_A|} (\dot{x}_A \cos \theta + \dot{y}_A \sin \theta) + \\
&(a + l \cos \alpha) \mu \frac{|\vec{N}_B|}{|\vec{v}_B|} (-\dot{x}_B \sin \theta + \dot{y}_B \cos \theta) + \\
&l \sin \alpha \mu \frac{|\vec{N}_B|}{|\vec{v}_B|} (\dot{x}_B \cos \theta + \dot{y}_B \sin \theta)
\end{aligned} \right\} \quad (6.5)$$

Das Ausrechnen der Klammerausdrücke für die Geschwindigkeiten in (6.5) liefert nach Einsetzen von (6.1) und (6.2) und Einführung der Bezeichnungen  $M_I$  und  $M_{II}$

$$\begin{aligned}
M_I &:= (a + l \cos \alpha) \cdot (-\dot{x}_s \sin \theta + \dot{y}_s \cos \theta - a\dot{\theta} - l\dot{\theta} \cos \alpha) + \\
& l \sin \alpha \cdot (\dot{x}_s \cos \theta + \dot{y}_s \sin \theta - l\dot{\theta} \sin \alpha) = \\
& \left\{ a (-\dot{x}_s \sin \theta + \dot{y}_s \cos \theta) - a^2 \dot{\theta} - a l \dot{\theta} \cos \alpha + \right. \\
& \left. l (-\dot{x}_s \sin (\theta - \alpha) + \dot{y}_s) \cos (\theta - \alpha) - a l \cos \alpha \dot{\theta} - l^2 \dot{\theta} \right\} \\
M_{II} &:= (a + l \cos \alpha) \cdot (-\dot{x}_s \sin \theta + \dot{y}_s \cos \theta - a\dot{\theta} - l\dot{\theta} \cos \alpha) \\
& - l \sin \alpha \cdot (\dot{x}_s \cos \theta + \dot{y}_s \sin \theta + l\dot{\theta} \sin \alpha) = \\
& \left\{ a (-\dot{x}_s \sin \theta + \dot{y}_s \cos \theta) - a^2 \dot{\theta} - a l \dot{\theta} \cos \alpha + \right. \\
& \left. l (-\dot{x}_s \sin (\theta + \alpha) + \dot{y}_s \cos (\theta + \alpha) - l a \cos \alpha \dot{\theta} - l^2 \dot{\theta}) \right\}.
\end{aligned}$$

Somit folgt die für die rechentechnische Umsetzung kompaktere Form des Drehimpulssatzes

$$\left( 2M(a^2 + l^2 + 2al \cos \alpha) + m(L - a)^2 \right) \ddot{\theta} = \mu \frac{|\bar{N}_A|}{|\bar{v}_A|} \cdot M_I + \mu \frac{|\bar{N}_B|}{|\bar{v}_B|} \cdot M_{II}. \quad (6.6)$$

#### 6.4.2 Simulationsrechnungen und Diskussion der Ergebnisse

Das System der Bewegungsdifferentialgleichungen aus Impuls- und Drehimpulssatz (6.3), (6.4) und (6.5) bzw. in der Form (6.6) wurde in Maple 8<sup>2</sup> numerisch integriert (siehe Anhang).

Als Eingabeparameter wurden gewählt:

$$M = 0,003 \text{ kg}; \quad m = 0,0015 \text{ kg};$$

$$L = 0,022 \text{ m}; \quad l = 0,01 \text{ m}; \quad \alpha = 95^\circ;$$

$$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}; \quad \mu = 0,01; \quad \omega = 25 \text{ s}^{-1};$$

$$A = 0,03 \text{ N}; \quad B = 0,03 \text{ N}; \quad \hat{F} = -0,03 \text{ N}.$$

Zur Ergebnisinterpretation wurde neben einer numerischen Ausgabe von Funktionswerten auch eine grafische Simulation der Bewegung des MINCH-ROBOT in der x-y-Ebene programmiert.

Die Abbildungen 6.11, 6.12 und 6.13 zeigen die Funktion  $\theta(t)$  und die Bewegung des Schwerpunktes in der x-y-Ebene bei gleicher Phasenlage für die Normalkräfte, d.h.  $\varphi_0 = \psi_0$ .

Wie erwartet, bewegt sich der Roboter rein translatorisch entlang der x-Achse.

Die Abbildung 6.13 ermöglicht bei Kenntnis der Simulationsdauer von  $T_{sim} = 3s$  zugleich die Bestimmung der Geschwindigkeit des Roboters. Für die angegebenen Parameter beträgt diese

$$v = 9,34 \frac{\text{cm}}{\text{s}}.$$

<sup>2</sup> Firma: Waterloo Maple Inc.

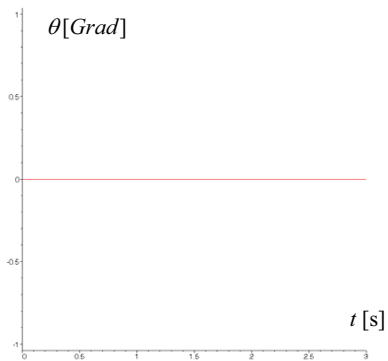
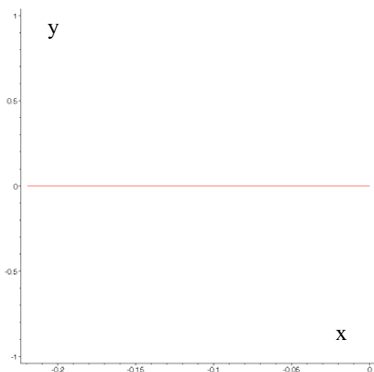
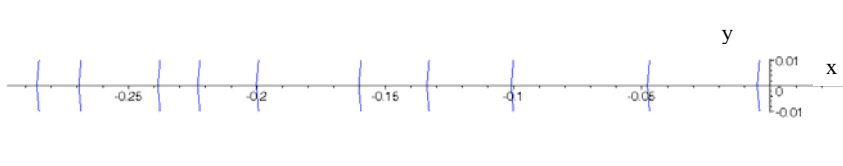
Abbildung 6.11: Funktion  $\theta(t)$ .Abbildung 6.12: Bewegung des Schwerpunktes (Darstellung  $y_S(x_S)$ ).

Abbildung 6.13: Simulation der Roboterbewegung.

Die Fähigkeit, den Roboter über die Phasenwinkel  $\varphi_0$  und  $\psi_0$  in seiner Richtung steuern zu können, zeigen die Abbildungen 6.14 bis 6.17. Für die Kombination der Phasenwinkel  $\varphi_0 = 0^\circ, \psi_0 = 10^\circ$  bewegt sich der Roboter nach rechts von der x-Achse gesehen, für

$\varphi_0 = 0^\circ, \psi_0 = -10^\circ$  nach links. Die Kurve in den Simulationen zeigt die Bewegung des Roboterschwerpunktes.

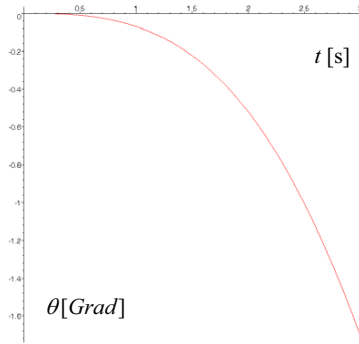


Abbildung 6.14: Funktion  $\theta(t)$  für  $\varphi_0 = 0^\circ, \psi_0 = 10^\circ$ .

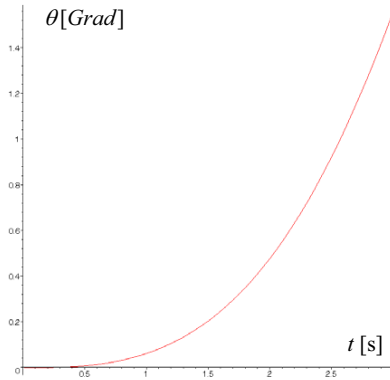


Abbildung 6.15: Funktion  $\theta(t)$  für  $\varphi_0 = 0^\circ, \psi_0 = -10^\circ$ .

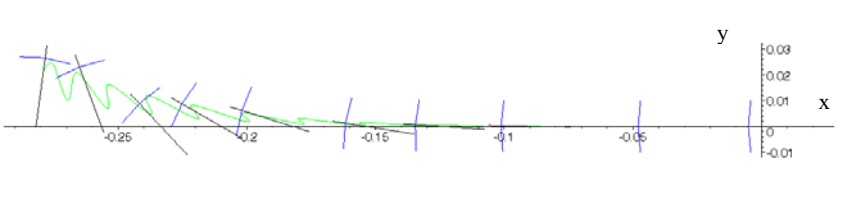


Abbildung 6.16: Simulation der Bewegung des MINCH-ROBOT für  $\varphi_0 = 0^\circ, \psi_0 = 10^\circ$ .



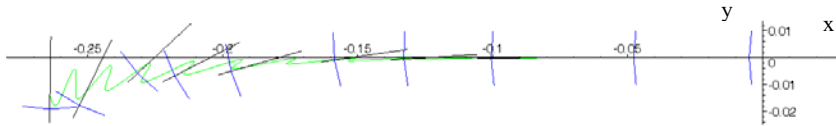


Abbildung 6.17: Simulation der Bewegung des MINCH-ROBOT für  $\varphi_0 = 0^\circ$ ,  $\psi_0 = -10^\circ$ .

Die Simulationsergebnisse werden durch die nachfolgenden experimentellen Untersuchungen mit Hilfe von Bildverarbeitungssystemen qualitativ sehr gut bestätigt. Eine Fehlerdiskussion bzw. die Bewertung unterschiedlicher Einflussfaktoren auf die Lokomotion erfolgt im nachfolgenden Abschnitt.

## 6.5 Experimentelle Untersuchungen am MINCH-ROBOT

### 6.5.1 Geschwindigkeitsmessungen bei verschiedenen Oberflächen

Die Geschwindigkeit des MINCH-ROBOT wird neben der steuerbaren Frequenz des Piezoaktors wesentlich von der Oberfläche, auf der sich das System bewegt, bestimmt. Geschwindigkeitsmessungen haben gezeigt, dass dieser Roboter eine hohe Geschwindigkeit bis zu  $v_{Max} = 0,8 \frac{m}{s}$  erreichen kann. Die Geschwindigkeit wurde bei drei verschiedenen Oberflächen (Metall, Kunststoff, Gewebe, Abb. 6.18) und einem Frequenzbereich von 0 bis 100 kHz gemessen.



Abbildung 6.18: Aufnahmen der drei Auflageflächen Aluminium (12,5 fach vergrößert), PVC (12,5 fach vergr.), Textiles Gewebe (5 fach vergr., v.l.n.r.).

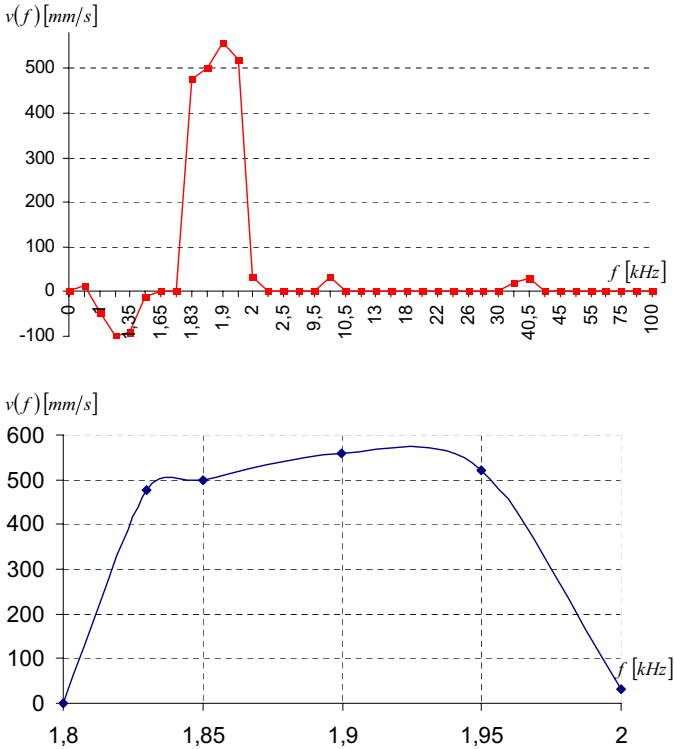


Abbildung 6.19: Geschwindigkeit des MINCH-ROBOT auf einer Metalloberfläche im Frequenzbereich von 0 bis 100 kHz (oben) und im „gezoomten“ Resonanzbereich (unten).

Die Abbildung 6.19 zeigt die Messergebnisse für eine Metalloberfläche. Folgende Feststellungen können getroffen werden:

- Für fast alle Frequenzen ergeben sich positive Geschwindigkeiten.
- Die größte Geschwindigkeit  $v = 0,54 \frac{m}{s}$  korrespondiert mit der Frequenz  $f = 1,9$  kHz.
- Negative Geschwindigkeiten erhält man im Frequenzbereich von  $f = 1$  kHz bis  $f = 1,55$  kHz.

Ähnliche Ergebnisse erhält man bei der Bewegung auf Kunststoff. Der Roboter ist aber im Vergleich zur Metalloberfläche langsamer bei positiven Geschwindigkeiten und erreicht betragsmäßig größere negative Geschwindigkeiten (Abb. 6.20).

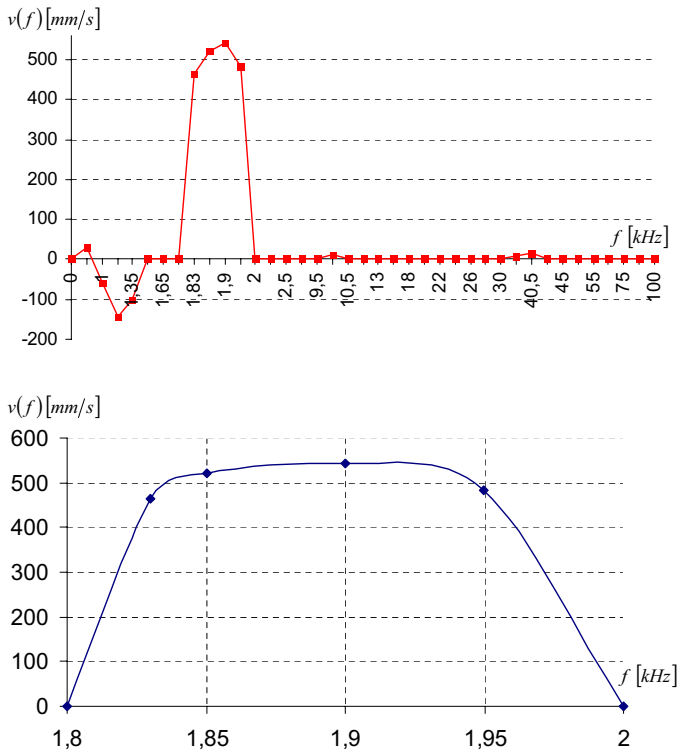


Abbildung 6.20: Geschwindigkeit des MINCH-ROBOT auf einer Kunststoffoberfläche im Frequenzbereich von 0 bis 100 kHz (oben) und im „gezoomten“ Resonanzbereich (unten).

Der Bewegungscharakter ändert sich bei der Bewegung auf textilem Gewebe. Der Roboter kann auf dieser Oberfläche nur positive Geschwindigkeiten entwickeln und dies auch nur im Resonanzbereich. Die Bewegung auf diesem Untergrund ist deutlich schneller als auf den oben genannten Oberflächen (Abb. 6.21).

Die Erklärung dafür liegt in der Rauheit des Gewebes. Die Paarung Metallbein/Gewebe verhindert ein Rutschen der Beine bei positiven Geschwindigkeiten. Gleichzeitig reicht die an den Endpunkten der Beine erreichte Amplitude nicht aus, um negative Geschwindigkeiten zu realisieren.

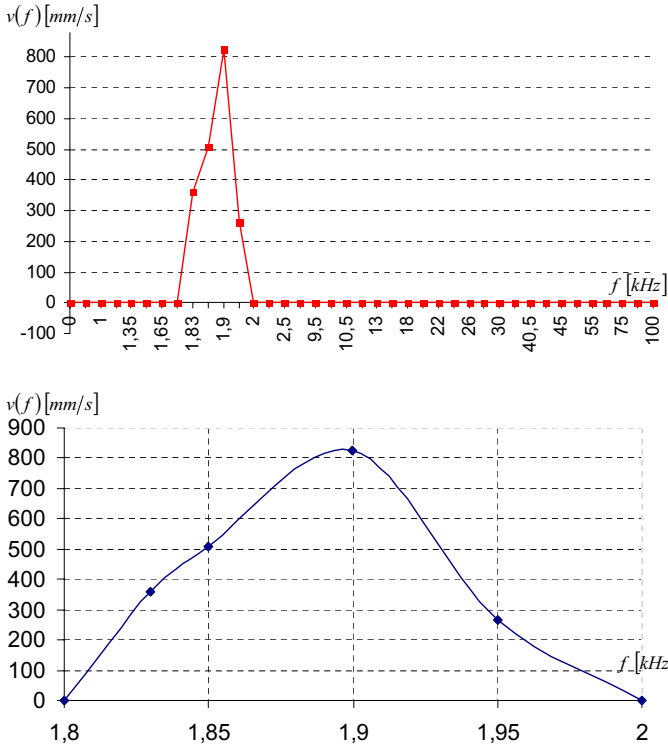


Abbildung 6.21: Geschwindigkeit des MINCH-ROBOT auf textilem Gewebe im Frequenzbereich von 0 bis 100 kHz (oben) und im „gezoomten“ Resonanzbereich (unten).

Das nachfolgende Experiment wurde durchgeführt, um zu zeigen, dass die Geschwindigkeit tatsächlich wesentlich von der Oberflächenrauheit bestimmt wird. Vier Metalloberflächen (Aluminium) wurden so bearbeitet, dass im Ergebnis vier verschiedene Rauheiten vorlagen. Danach wurde die Geschwindigkeit des MINCH-ROBOT auf diesen Oberflächen bei drei Frequenzen des Piezoaktuators gemessen. Die Abbildung 6.22 zeigt die Ergebnisse der Messungen.

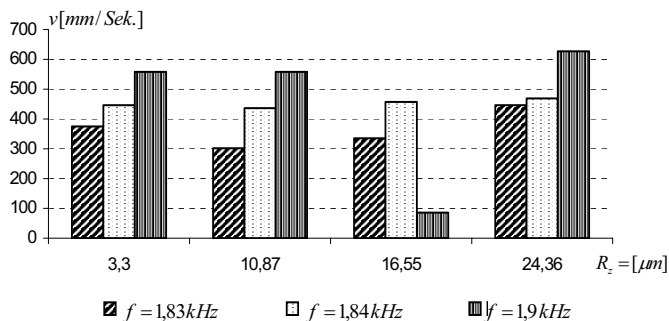


Abbildung 6.22: Einfluss der Rauheit auf die Geschwindigkeit des MINCH-ROBOT.

Die Abbildung 6.22 zeigt, dass die Geschwindigkeit prinzipiell mit zunehmender Rauheit steigt. Aber für jede Frequenz gibt es eine (oder mehrere) Rauheiten, bei der die Geschwindigkeit des Roboters kleiner wird.

- $R_z = 10,87 \mu\text{m}$  und  $R_z = 16,55 \mu\text{m}$  für  $f = 1,83 \text{ kHz}$ ,
- $R_z = 10,87 \mu\text{m}$  für  $f = 1,84 \text{ kHz}$ ,
- $R_z = 16,55 \mu\text{m}$  für  $f = 1,9 \text{ kHz}$ .

Als Erklärung wird das schon im Abschnitt 6.2 angeführte periodische Stoß-Regime der Beine in der Wechselwirkung mit der Auflagefläche herangezogen. Dies führt wie beschrieben (Abb. 6.3) zu veränderten Trajektorien der Beinendpunkte gegenüber den bei freier (kontaktloser) Schwingung auftretenden Kurven.

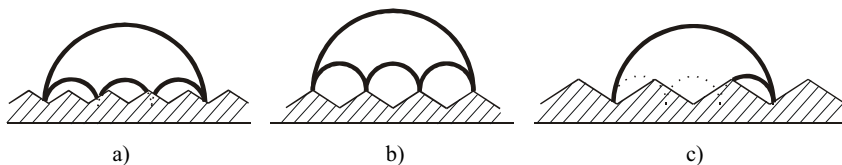


Abbildung 6.23: Trajektorien des Beinendpunktes über Auflageflächen mit verschiedener Rauheit.

Der Stoß zwischen dem Bein und der Oberfläche führt zu periodischen Stößen (Sekundärvibrationen) mit einer Amplitude, die kleiner ist, als die Primär-Amplitude des Beines aus den Transversal- und Longitudinaleigenschwingformen. Wenn diese Amplitude mit dem Abstand zweier bzw. mehrerer „Spitzen“ der Oberfläche zusammenfällt, wird die Primär-Amplitude gestört und die Geschwindigkeit reduziert (Abb. 6.23 b)).

Die Sekundär-Vibration (Sekundär-Amplitude) kann auch zur Erhöhung der Geschwindigkeit beitragen. Bei niedriger (oder höherer) Rauheit im Vergleich zum eben diskutierten Fall kann die Sekundär-Amplitude groß genug sein, um den Beinendpunkt in einem „Tal“ der Oberfläche zu positionieren (Abb. 6.23 a), c)). Damit wird das Wegrutschen des Beins verhindert und die Geschwindigkeit vergrößert. Eine extrem hohe Rauheit verhindert das Beinrutschen generell und führt zu großen Geschwindigkeiten.

### 6.5.2 Einsatz von Bildverarbeitungssoftware und High-Speed-Kamera

Um die schnellen Bewegungen und Deformationen (sowohl die internen periodischen Deformationen als auch die Fortbewegung insgesamt) des MINCH-ROBOT zu analysieren, wurde eine High-Speed-Kamera<sup>3</sup> eingesetzt. Dies ermöglichte auch die Beinbewegungen, die aufgrund der hochfrequenten Anregung nicht nur sehr schnell, sondern auch sehr klein sind, zu betrachten. Die High-speed-Kamera gestattet in Verbindung mit der Auswertesoftware, diese schnellen Bewegungen eines Beines zu verlangsamen und zu vergrößern.

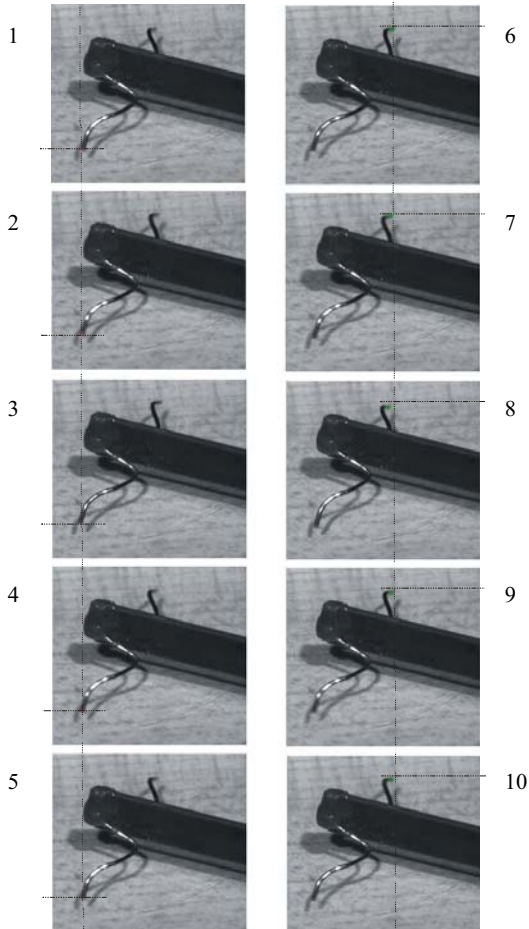


Abbildung 6.24: Beinbewegungen aufgenommen mit einer High-Speed-Kamera.

<sup>3</sup> Typ: Photron Fastcam Ultima APX RS, model 250K.

Mit 6000 Bildern pro Sekunde wurde die Bewegung der Beine aufgenommen (Abb. 6.23). Das Softwarepaket WINAnalyze bietet die Möglichkeit die Beinbewegungen zu analysieren bzw. die Form dieser Bewegungen abzubilden (Abb. 6.25).

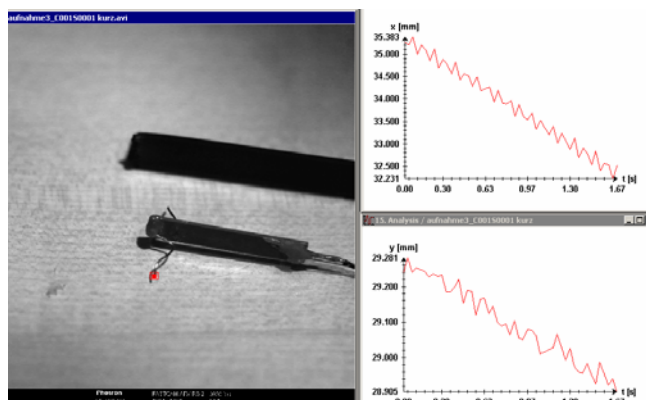


Abbildung 6.25: Bewegungsanalyse des Beines mittels des Softwarepaketes WINAnalyze.

In der Abbildung 6.25 ist neben einer Momentaufnahme (links) eine Darstellung der Koordinaten  $x$  und  $y$  als Funktion der Zeit zu sehen (rechts). Die Werte, die durch das Softwarepaket WINAnalyze ermittelt wurden, bieten die Basis für die Bestimmung der Trajektorie (Abb. 6.26, oben) des Beinendpunktes.

Die Abbildungen 6.26 und 6.27 zeigen die Bewegungsbahn und die Bewegungsform der Beine für die Frequenz  $f=1,8$  kHz. Qualitativ sehr gut bestätigt werden im Experiment die theoretisch beschriebenen Trajektorien der Beinendpunkte (vgl. Abb. 6.2 a) !).

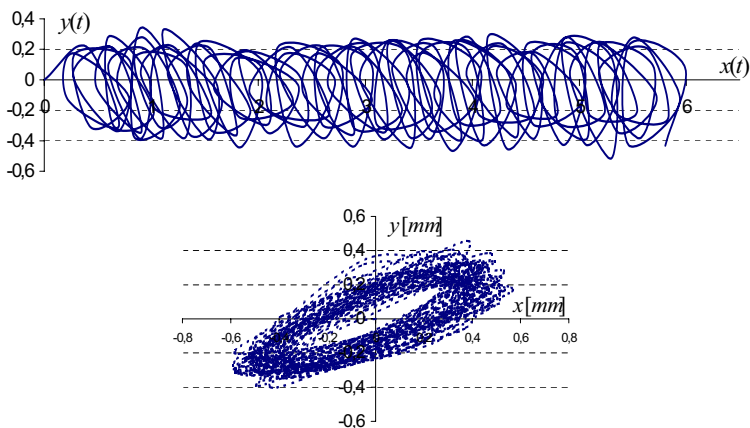


Abbildung 6.26: Trajektorie (oben) und Bewegungsform (unten) des rechten Beines bei der Frequenz  $f=1,8$  kHz.

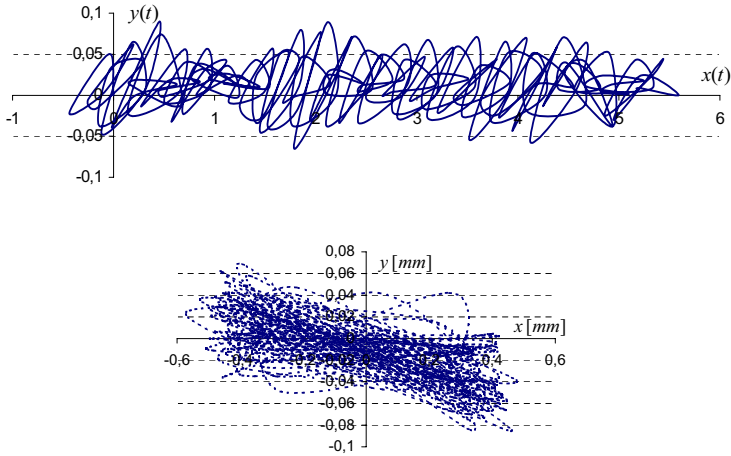


Abbildung 6.27: Trajektorie (oben) und Bewegungsform (unten) des linken Beines bei der Frequenz  $f=1,8$  kHz.

Die Abbildungen 6.28 und 6.29 zeigen, dass man ein qualitativ ähnliches Verhalten auch für die höhere Frequenz von  $f=1,85$  kHz erhält.

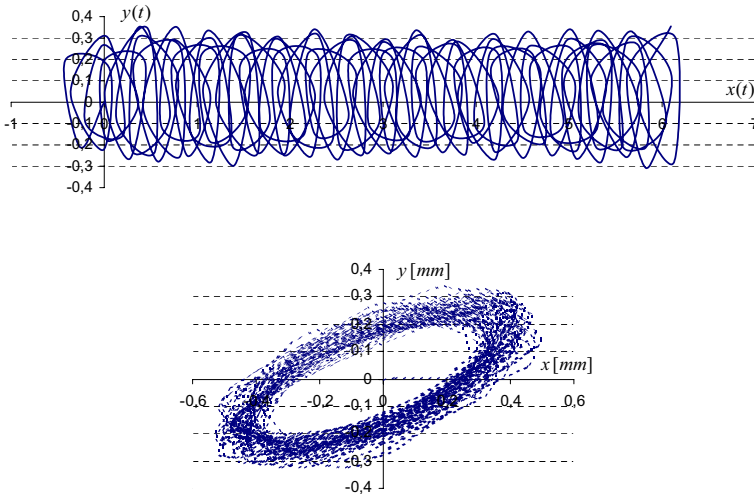


Abbildung 6.28: Trajektorie (oben) und Bewegungsform (unten) des rechten Beines bei der Frequenz  $f=1,85$  kHz.



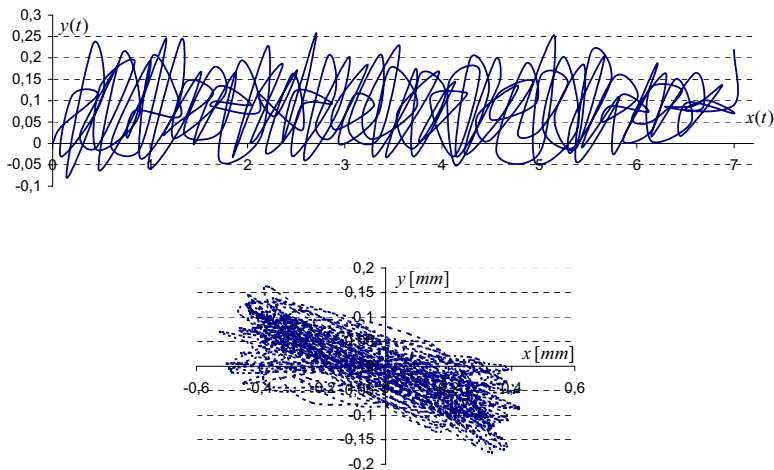


Abbildung 6.29: Trajektorie (oben) und Bewegungsform (unten) des linken Beines bei der Frequenz  $f=1,85$  kHz.

Deutlich zu erkennen ist dabei, dass eine Nichtsymmetrie in den Bewegungen der Beinendpunkte links und rechts besteht. Es handelt sich bei den Bewegungsbahnen in der  $x$ - $y$ -Ebene nicht nur um gedrehte Ellipsen (ca.  $45^\circ$  zur Horizontalen), wie ausgeprägt beim rechten Bein erkennbar. Dieser Effekt ist, wie im Abschnitt 6.2 beschrieben, für die Richtungssteuerbarkeit des Systems von wesentlicher Bedeutung ist.



# Kapitel 7

## Zusammenfassung und Ausblick

Im Mittelpunkt dieser Arbeit standen undulatorische Lokomotionssysteme. In diesem Zusammenhang wurden die Begriffe **Undulation** und **Lokomotion** (mit dem Versuch einer qualitativ und quantitativen Charakterisierung) definiert. Die gerichtete Ortsveränderung natürlicher oder technischer Systeme ist generell als Lokomotion zu verstehen, aber es erweist sich als schwierig, eine aus Sicht der Mechanik umfassende Definition des Begriffes Lokomotion zu geben. Er wurde in dieser Arbeit, mathematisch, wie folgt beschrieben:

Lokomotionssysteme sind technische Systeme, die in der Lage sind, alle ihre Punkte in einem ausgewählten charakteristischen Zeitintervall zu bewegen, wobei durchaus Größe und Richtung der Lageänderung der Punkte verschieden sein können. Die Verschiebung des Massenmittelpunktes oder die mittlere Verschiebung aller Punkte des Körpers zur Zeit sind als Maß für solche Bewegungen zu verstehen.

Undulation ist ein spezielles Fortbewegungsprinzip, das nicht im engen Sinne einer wellenförmigen Bewegung, wie in der Biologie üblich, gebraucht werden soll. Die Mechanik versteht unter Undulation die Bewegung durch eine Erregung der Aktuatoren des Systems, die sowohl von außen kommen oder im Inneren erzeugt werden kann. Der Aktuator erzeugt seinerseits eine in der Regel periodische Gestaltänderung, welche durch die Wechselwirkung mit der Umgebung eine globale Lageänderung erzeugt.

In der vorliegenden Arbeit wurden undulatorische Lokomotionssysteme theoretisch und mittels zweier entwickelter Prototypen untersucht.

Der erste Prototyp (TM-ROBOT) wurde nach dem undulatorischen Bewegungsprinzip des Regenwurms (Längenänderung von Segmenten) aufgebaut.

Dieser Prototyp diente zur experimentellen Verifizierung der theoretischen Ergebnisse dieser Arbeit und der Simulationsrechnungen vorheriger Arbeiten wie [Steigenberger04] und [Huang03]. Ein Bewegungssystem, das für die Bewegung das peristaltische Bewegungsprinzip nutzt, bewegt sich mit periodischen Verformungen seines Körpers und nichtsymmetrischen Reibkräften unter Einbeziehung der Wechselwirkung mit der Umgebung.

In dieser Arbeit wurden zur Dynamik dieses Lokomotionssystems

- die notwendigen Bewegungsbedingungen im Kontext der kinematischen Gaits und
- die hinreichenden Bewegungsbedingungen im Kontext der Kontraktions-/Extensionskräfte und der Reibkräfte

formuliert.

Weitere theoretische Untersuchungen wurden zur Bestimmung

- des Steigungswinkel, den das System überwinden kann, für alle kinematischen Steuerungen (Gaits),
  - ausgewählter Gaits, die eine nahezu konstante Geschwindigkeit der Massenpunkte realisieren,
- durchgeführt.

Die Reibkräfte der „Spikes“-Struktur, der maximale Steigungswinkel und das Weg-Zeit-Verhalten der einzelnen Massenpunkte und des Gesamtsystems wurden im Rahmen dieser Arbeit ermittelt.

Bei den Wegmessungen der Massenpunkte wurde festgestellt, dass die „idealen“ kinematischen Zwangsbedingungen  $\dot{x}_i > 0$  über die „Spikes“ nicht vollständig umgesetzt werden können. Es existiert ein veränderter Prototyp, der diese Zwangsbedingungen mittels Räder und Reibdaumen an der Radachse zur Sperrung einer Drehrichtung erfüllen kann [Steigenberger05]. Der radbasierte Prototyp kann die Bewegung jedoch nur unter der Voraussetzung umsetzen, dass die Reibkraft zwischen dem Radgummi und der Unterlage groß genug ist, um ein Rückwärtsrutschen zu verhindern.

Der zweite Prototyp (MINCH-ROBOT) im Rahmen dieser Arbeit ist ein Mikroroboter, der keine klassische undulatorische Lokomotion umsetzt. Er besteht aus einem Piezoaktuator und ist mit zwei passiven Beinen und einem Schwanz ausgerüstet. Die Undulation besteht in der Übertragung von den hochfrequenten Schwingungen seines Körpers (Piezoaktuator) auf die Beine. Somit werden komplexe räumliche Trajektorien der Beinendpunkte erzeugt, wie durchgeführte FEM-Berechnungen und High-speed-Kamera Aufnahmen bestätigen.

Die Dynamik dieses Systems wurde mittels eines Massenpunktsystem-Modells (bestehend aus drei Massenpunkte, einer periodischen Antriebskraft und periodisch veränderlichen Normalkräften an den Beinendpunkten) prinzipiell beschrieben.

Bei dem Steuerprinzip dieses Mikroroboters spielt die Nichtsymmetrie der beiden Beine eine wesentliche Rolle. Diese (absichtlich realisierte) Nichtsymmetrie zwischen rechtem und linkem Bein ist die Ursache für eine Verschiebung der Resonanzbereiche der Beine. Damit wird der Roboter in seiner Richtung steuerbar. Bei den Simulationen des Massenpunktsystem-Modells wurde dieses Prinzip mit der Hilfe von unterschiedlichen Phasenverschiebungen der Normalkräfte umgesetzt.

Experimentelle Untersuchungen und Messungen haben bewiesen, dass die Geschwindigkeit des MINCH-ROBOT von der Oberflächenrauheit abhängt.

Als Ausblick seien an dieser Stelle weiterführende Aufgaben, die aus dieser Arbeit und dem Gebiet der Mikrobewegungssysteme insgesamt ergeben, aufgeführt.

1) Perspektivische Aufgaben zum TM-ROBOT:

- die Suche nach optimalen Gaits, für unterschiedliche Bewegungsaufgaben,

- 
- die Nutzung anderer Aktuatoren (Umsetzung neuer Wirkprinzipien, siehe Abschnitt zum „Stand der Technik“ - magnetische Materialien), die das System stabiler, schneller und einsetzbarer für verschiedene Aufgaben machen,
  - Konstruktion gleichartiger Systeme mit höherem Freiheitsgrad,
  - Weiterentwicklung mit dem Ziel der Erreichung eines autonomen Systems,
  - Entwicklung einer verbesserten Steuerung, um neben den Geschwindigkeiten  $l_i(t)$  noch andere Steuergrößen beeinflussen zu können.
- 2) Perspektivische Aufgaben zum MINCH-ROBOT:
- Realisierung eines autonomen Systems (Energie, Information),
  - Design-Optimierung (Form, Länge der Beine) zur Geschwindigkeitserhöhung,
  - Implementierung von Sensoren und Werkzeugen für Inspektions- und Manipulationsaufgaben.

Alle Prototypen in dieser Arbeit sind Einzelsysteme. Im Zusammenhang mit aktuellen Entwicklungen in der Robotik zu kooperierenden Systemen (Stichwort „Schwarmverhalten“) erscheint besonders die Weiterführung von Arbeiten zum „low-cost System“ MINCH ROBOT vielversprechend.



## Anhang

Maple-Programm zur Lösung der direkten Aufgabe der Dynamik für das Modell MINCH-ROBOT-Massenpunktsystem

```
> # *****
> # *      Simulation der Bewegung des MINCH-ROBOT      *
> # *****
> restart:
> with(plots):
> with(plottools):
> pi:=evalf(Pi):
> #
> # Definition der Variablen
> #
> vars:={x1(t),x2(t),x3(t),x4(t),x5(t),x6(t)}:
> #
> # Definition der Konstanten
> #
> Tend:=3.0:
> g:=9.80775:gl:=0.022:l:=0.01:alpha:=95*pi/180:my:=0.01:omega:=25:
> m0:=0.0015:m1:=0.003:
> A0:=0.03:B0:=0.03:F0:=-0.03:phi0:=0*pi/180:psi0:=0*pi/180:
> #
> a:=(gl*m0-2*m1*l*cos(alpha))/(2*m1+m0):
> #
> # Definition der Erregungen
> #
> Fd:=t->F0*sin(omega*t):
> Naerr:=t->A0*sin(omega*t+phi0):
> Nberr:=t->B0*sin(omega*t+psi0):
> # Definition der Geschwindigkeiten
```

```

> #
> xa1p:=t->x2(t)+a*sin(x5(t))*x6(t)+l*sin(x5(t)-alpha)*x6(t):
> xa2p:=t->x4(t)-a*cos(x5(t))*x6(t)-l*cos(x5(t)-alpha)*x6(t):
> #
> xb1p:=t->x2(t)+a*sin(x5(t))*x6(t)+l*sin(x5(t)+alpha)*x6(t):
> xb2p:=t->x4(t)-a*cos(x5(t))*x6(t)-l*cos(x5(t)+alpha)*x6(t):
> #
> absneu:=x->sqrt(x^2):
> va:=t->sqrt(xa1p(t)^2+xa2p(t)^2):
> vb:=t->sqrt(xb1p(t)^2+xb2p(t)^2):
> #
> # Definition der Normalkräfte
> #
> Na:=m1*g;
> Nb:=m1*g;
> Nd:=m0*g;
> #
> # Definition des Trägheitsmomentes
> #
> mtm:=2*m1*(a^2+l^2-2*a*l*cos(pi-alpha))+m0*(gl-a)^2:
> #
> # Definition der Momente
> #
> mo1:=t->a*(-x2(t)*sin(x5(t))+x4(t)*cos(x5(t)))-a^2*x6(t)-a*l*x6(t)*cos(alpha)+
l*(-x2(t)*sin(x5(t)-alpha)+x4(t)*cos(x5(t)-alpha))-a*l*cos(alpha)*x6(t)-l^2*x6(t):
> mo2:=t->a*(-x2(t)*sin(x5(t))+x4(t)*cos(x5(t)))-a^2*x6(t)-a*l*x6(t)*cos(alpha)+
l*(-x2(t)*sin(x5(t)+alpha)+x4(t)*cos(x5(t)+alpha))-a*l*cos(alpha)*x6(t)-l^2*x6(t):
> #
> # Dgl-System lösen
> #
> init:=x1(0)=0.0,x2(0)=0.0001,x3(0)=0.0,x4(0)=0.0,x5(0)=0.0,x6(0)=0.0:
> #
> dsys:=diff(x1(t),t)=x2(t),
diff(x2(t),t)=1/(2*m1+m0)*(-my*absneu(Na+Naerr(t))*xa1p(t)/va(t)-
my*absneu(Nb+Nberr(t))*xb1p(t)/vb(t)+F0*sin(omega*t)*cos(x5(t))),
diff(x3(t),t)=x4(t),
diff(x4(t),t)=1/(2*m1+m0)*(-my*absneu(Na+Naerr(t))*xa2p(t)/va(t)-
my*absneu(Nb+Nberr(t))*xb2p(t)/vb(t)+F0*sin(omega*t)*sin(x5(t))),

```



```

diff(x5(t),t)=x6(t),
diff(x6(t),t)=(1/mtm)*(my*absneu(Na+Naerr(t))/va(t)*mo1(t)+my*absneu(Nb+Nberr(t))/
vb(t)*mo2(t)):
> #
> ans:=dsolve({dsys,init},vars,type=numeric,output=listprocedure):
> xx1:=subs(ans,x1(t)):
> xx2:=subs(ans,x2(t)):
> xx3:=subs(ans,x3(t)):
> xx4:=subs(ans,x4(t)):
> xx5:=subs(ans,x5(t)):
> xx6:=subs(ans,x6(t)):
> plot(xx1,0.0..3.0);
> plot(xx5,0.0..3.0);
> plot([xx1,xx3,0.0..2.0]);
> #
> # Grafik des Roboters
> #
> t:=0:
> #
> for i from 1 by 1 to 10 do:
Ax[i]:=xx1(t)-(a+l*cos(alpha))*cos(xx5(t))-l*sin(alpha)*sin(xx5(t)):
Ay[i]:=xx3(t)-(a+l*cos(alpha))*sin(xx5(t))+l*sin(alpha)*cos(xx5(t)):
Bx[i]:=xx1(t)-(a+l*cos(alpha))*cos(xx5(t))+l*sin(alpha)*sin(xx5(t)):
By[i]:=xx3(t)-(a+l*cos(alpha))*sin(xx5(t))-l*sin(alpha)*cos(xx5(t)):
Cx[i]:=xx1(t)-a*cos(xx5(t)):
Cy[i]:=xx3(t)-a*sin(xx5(t)):
Dx[i]:=xx1(t)+gl*cos(xx5(t)):
Dy[i]:=xx3(t)+gl*sin(xx5(t)):
Ex[i]:=xx1(t)-2*a*cos(xx5(t)):
Ey[i]:=xx3(t)-2*a*sin(xx5(t)):
t:=t+Tend/9:
> end do:
> #
> for i from 1 by 1 to 10 do:
l1[i]:=line([Ax[i],Ay[i]],[Cx[i],Cy[i]],color=blue,linestyle=1):
l2[i]:=line([Bx[i],By[i]],[Cx[i],Cy[i]],color=blue,linestyle=1):
l3[i]:=line([Cx[i],Cy[i]],[Dx[i],Dy[i]],color=black,linestyle=1):
l3[i]:=line([Dx[i],Dy[i]],[Ex[i],Ey[i]],color=black,linestyle=1):

```

end do:

```
> grafik4:=plot([xx1,xx3,0.0..Tend],color=green):  
> display(I1[1],I2[1],I3[1],I1[2],I2[2],I3[2],I1[3],I2[3],I3[3],  
I1[4],I2[4],I3[4],I1[5],I2[5],I3[5],I1[6],I2[6],I3[6],  
I1[7],I2[7],I3[7],I1[8],I2[8],I3[8],I1[9],I2[9],I3[9],  
I1[10],I2[10],I3[10],grafik4);  
> #
```

# Literaturverzeichnis

- Behn05** C. Behn: *Ein Beitrag zur adaptiven Regelung technischer Systeme nach biologischem Vorbild*, Cuvillier-Verlag, Göttingen (Deutschland), 2005, ISBN 3-86537-387-9.
- Belson05** Belson, A.: "Endoscope with single step guiding apparatus" United States Patent Nr. 6,974,411 December 13, 2005.
- Berns00** Berns, K.: The Walking Machine Catalogue. 2000. (<http://www.fzi.de/WMC.html>).
- Bögelsack02** Bögelsack, G. & Schilling, C.: *Terminologie zur Biomechanik der Bewegung*. In: Nomenklatur-Katalog - Begriffe und Definitionen d. IFToMM-Kommission "Standards of Terminology" der "Int. Federation for the Promotion of Mechanisms and Machine Science", 2002, S 30.
- Brock94** Brock, D.; Lee, W.; Segalman, D.; Witkowski, W.: *A dynamic model of a linear actuator based on polymer hydrogel*. Journal of Intelligent Materials and Structures, in Press 1994.
- Chiel02** Chiel, H. J., Mangan, E. V., Kingsley, D. A., Quinn, R. D.: *Development of a peristaltic endoscope*, International Congress on Robotics and Automation 2002, 347-352.
- Crespi05a** Crespi, A. Badertscher, A., Guignard, A. and Ijspeert, A.J.: *AmphiBot I: an amphibious snake-like robot*, Robotics and Autonomous Systems, vol. 50, issue 4, 31 March 2005, 163-175.
- Crespi05b** Crespi, A. Badertscher, A., Guignard, A. and Ijspeert, A.J.: *Swimming and Crawling with an Amphibious Snake Robot*, ICRA 2005.
- Couvillon06** Couvillon, Jr.; Lucien, A.: *Universal, programmable guide catheter*. United States Patent Nr. 6,997,870 February 14, 2006.
- Dario99** Dario P., Carrozza M.C., Pietrabissa A., Magnani B., Lencioni L.: *Endoscopic robot*, United States Patent Nr. 5,906,591, May 25, 1999.
- Date01** Date, H., Hoshi, Y., Sampei, M., Shigeki, N.: *Locomotion control of a snake robot with constraint force attenuation*. In: Proceedings of the American Control Conference. AACC, June 2001, 113-118.
- Dowling97** Dowling, K.: *Limbless locomotion: Learning to crawl with a snake robot*. Ph.D. thesis, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 1997.
- Fatikow97** Fatikow, S.; Rembold, U.: *Microsystem technology and microrobotics*. Springer-Verlag 1997, ISBN: 3-540-60658-0.

- Ferworn95** Ferworn, A.; Stacey, D. A.: *Inchworm mobility--stable, reliable and inexpensive*. Proceedings of the 3rd IASTED International Conference for Robotics and Manufacturing, June 14-16 1995, Cancun, Mexico.
- Forth76** Forth, E.; Schewitzer, E.: *Bionik*. Meyers Taschenlexikon, VEB Bibliographisches Institut Leipzig, 1976.
- Fukuda99** Fukuda, T.; Kurashige, K.; Arai, F.: *Recent topics on robotics actuation technologies*. Tenth World Congress on the Theory of Machine and Mechanisms, Oulu, Finland, June 20-24, 1999.
- González04** González-Gómez, J, Aguayo, E., Boemo, E.: *Locomotion of a Modular Worm-like Robot using a FPGA-based embedded Micro Blaze Soft-processor*, 7th International Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR 2004. CSIC, Madrid (Spain). September, 2004.
- Granosik05** Granosik, G., Hansen, M. G., Borenstein, J.: *The OmniTread Serpentine Robot for Industrial Inspection and Surveillance*. International Journal on Industrial Robots, Special Issue on Mobile Robots, Vol. IR32-2, March 18th, 2005, 139-148.
- Gray68** Gray, J.: *Animal Locomotion*, W. W. Norton Co., London, 1968, 166-193.
- Hertzberg99** Hertzberg, J.; Kirchner, F.; Licht, U.; Rome, E.; Schoenherr, F.; Christaller, Th.: *MAKRO -- Bau einer mehrsegmentigen autonomen Kanalroboterplattform*. In: Pipeline Integrity – Uneingeschränkte Verfügbarkeit und unbegrenzte Nutzungsdauer von Rohrleitungen und Rohrnetzen, Essen (Vulkan-Verlag) 1999, 504-513.
- Hirose76** Umetani, Y., Hirose, S.: *Biomechanical study of active cord mechanism with tactile sensors*. In: Proceedings of the 6th international symposium on industrial robots. Nottingham, 1976, c1-1-c1-10.
- Hirose93** Hirose, S.: *Biologically inspired robots: snake-like locomotors and manipulators*. Oxford University Press, 1993, ISBN 0 19 856261 6.
- Hirose01a** Mori, M., Hirose, S.: *Development of Active Cord Mechanism ACM-R3 with Agile 3D mobility*, Proc. IROS, Hawaii, 2001, 1552–1557.
- Hirose01b** Takayama, T., Hirose, S.: *Development of "Souryu-I & IP"*. Proc. TITech COE/Super Mechano-Systems Symposium 2001, HRS-1.
- Hirose02** Hirose, S. and Fukushima, E.F.: *Snakes and strings: New robotic components for rescue operations*. In B. Siciliano and D. Paolo, editors, Experimental Robotics VIII: Proceedings of the 8th International Symposium ISER02, 2002, 48–63. Springer-Verlag.
- Hoeg00** Hoeg, H.D.; Slatkin, A.B.; Burdick, J.W; Grundfest.; W.S.: *Biomechanical modeling of the small intestine as required for the design and operation of a robotic endoscope*. IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation, San Francisco, CA, 2000, 1599-1606.

- 
- Hong05** Hong, D. W.: *Whole Skin Locomotion Inspired by Amoeboid Motility Mechanisms*. WW-EAP Newsletter, Vol. 7, No. 1, June 2005.
- Huang03** Huang, J.: *Modellierung, Simulation und Entwurf biomimetischer Roboter basierend auf apedaler undulatorischer Lokomotion*. Verlag ISLE, 2003, ISBN 3-932633-75-X.
- Ishihara96** Ishihara, H.; Arai, F.; Fukuda, T.: *Micro mechatronics and micro actuators*. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, Vol.1 No.1, March 1996, 68-79.
- Jorgensen04** Jorgensen, M.W., Ostergaard, E.H.,Lund, H.H.: *Modular ATRON: modules for a self-reconfigurable robot*. Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 28- October 2, 2004, Sendai, Japan.
- Kamimura04** Kamimura, A., Kurokawa, H., Yoshida, E., Murata, S., Tomita K., Kokaji, S.: *Self-Reconfigurable Robots: Platforms for Emerging Functionality*, Embodied Artificial Intelligence, Lecture Notes in Artificial Intelligence 3139, 2004, 312-330, Springer-Verlag.
- Klaassen99** Klaassen, B.; Paap, K.L.: "*GMD-SNAKE2: A Snake-Like Robot Driven by Wheels and a Method for Motion Control*", Proc. of 1999 IEEE Int'l Conference on Robotics and Automation, Detroit, MI, May 10-15, 1999, 3014-3019.
- Kotay96** Kotay, K.D.; Rus, D.L.: *Designing and building an inchworm climbing robot*. Department of Computer Science, Dartmouth College Hanover, NH 03755 Sep.1996.
- Kunz00** Kunz, H.: *Finite deformation of an earthworm segment*. 16th International Conference Computational Mechanics, Czech Society of Mechanics in Pilsen, Nectiny, 2000, 251-258.
- Kunz01** Kunz, H.: *Peristaltische Lokomotion - Modellbildung und technische Applikation*. Dissertation von TU-Ilmenau, Books on Demand (Schweitz) GmbH, 2001, ISBN 3-0344-0109-4.
- Lee94** Lee, T., Ohm, T., Hayati, S.: *A highly redundant robot system for inspection*. Proceedings of the Conference on Intelligent Robotics in the Field, Factory, Service, and Space (CIRFFSS '94), Houston, Texas, March 21-24, 1994, 142-149.
- Lobontiu98** Lobontiu, N.; Gordon, K.; Fisher, G.; Garcia, E.; Goldfarb, M.: *Design and Analysis of Elastodynamic Locomotion for Robotic Insects*. Microrobotics and Microassembly, Proceedings of SPIE, Vol. 3519, November 1998, 118-127.
- Ma01** Ma, S.; Araya, H.; Li, L.: *Development of a creeping snake- robot*. In: Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. IEEE, July-August 2001, 77-82.

- Martel01** Martel, S.; Koker, T.; and Hunter, I.: *Main issues for embedding onto a wireless miniature robot, a scanning tunnelling positioning system capable of atomic resolution over a half-meter diameter surface area*, *Proceedings of SPIE: Microrobotics and Microassembly*, Newton, MA, Oct. 29-31, 2001.
- Matsuno03** Matsuno, F.; Suenaga, K.: *Control of redundant 3D snake robot based on kinematic model*. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. IEEE, September 2003, 2061-2066.
- McIsaac99** McIsaac, K., Ostrowski, J.: *A geometric approach to anguilliform locomotion: Simulation and experiments with an underwater eel-robot*. In: *ICRA: Proceedings of 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1999, 2843-2848.
- Minchenija05** Minchenija, V.; Chigarev, A.; Zimmermann, K.; Abaza, K.: *The dynamics of a microrobot with three fulcrums on the planer surface*. 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, 2005, Herausgeber: Rektor der TU Ilmenau, elektronische Veröffentlichung.
- Miller88** Miller, G.S.P.: *The Motion dynamics of snakes and worms*. *Computer Graphics* 22, 1988, 169-173.
- Miller02** Miller, G.: *Neurotechnology for biomimetic robots*. Bradford/MIT Press, Cambridge London, Ch. *Snake robots for search and rescue*, 2002.
- Moraleda99** Moraleda, J.; Ollero, A.; Orte, M.: *A robotic system for internal inspection of water pipelines*. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Sep. 1999.
- Murray94** Murray, R. and Kelly, S.: *Geometric Phases and Robotic Locomotion*. *J. Robotic Systems*, 12(6):417-431, 1995, CDS Technical Report 94-014.
- Murray95** Ostrowski, J. Burdick, J., Murray, R. and Lewis, A.: *The mechanics of undulatory locomotion: the mixed dynamic and kinematic case*. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, May 1995.
- Nachtigall97** Nachtigall, W.: *Vorbild Natur: Bionik-Design für funktionelles Gestalten*. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hongkong; London; Mailand; Paris; Santa Clara; Singapur; Tokio: Springer, 1997, ISBN: 3-540-63245-x.
- Nakamura91** Nakamura, Y.: *Advanced robotics: redundancy and optimization*. University of California, 1991, ISBN 0-201-15198-7.
- Ostrowski96** Ostrowski, J.; Burdick, J.: *Gait kinematics for a serpentine robot*. In: *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, April 1996, 1294-1299.

- Peters86** Peters, W.; e, V.: *Der Regenwurm - Lumbricus terrestris L.* Quelle & Meyer Verlag 1986. ISBN: 3-494-01124-9.
- Quillin99** Quillin, K.J.: *Kinematic scaling of locomotion by hydrostatic animals: ontogeny of peristaltic crawling by the earthworm. Lumbricus Terrestris.* The Journal of Experimental Biology 202, 1999, 661–674.
- Schiessle02a** Schiessle, E. et al.: *Mechatronik 1*, Reihe Elektronik, 2002, ISBN 3-8023-1860-9, Vogel Buchverlag Würzburg.
- Schiessle02b** Schiessle, E. et al.: *Mechatronik 2*, Reihe Elektronik, 2002, ISBN 3-8023-1904-4, Vogel Buchverlag Würzburg.
- Schilling99** Schilling, C.; Blickhan, R.: *Biological motion systems and microtechnical devices.* Conf. Biomimetics, Berlin, 1999.
- Scholl00** Scholl, K.U., Kepplin, V., Berns, K., Dillmann, R.: “*Controlling a multi-joint robot for autonomous sewer inspection*”, Proc. IEEE Int’l Conference on Robotics and Automation, ICRA '00, vol.2, 2000, 1701-1706.
- Schütz04** Schütz, P.: *Handbuch Schrittmotorsteuerung*, TETRA GmbH, 2004.
- Siegwart95** Siegwart, R. Y.; Bleule, H.: *Micro- and nanorobotics in switzerland.* IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'95), August 6, 1995, Pittsburgh Pennsylvania, USA.
- Slatkin95** Slatkin, AB., Burdick, J., Grundfest, W.: *The development of a robotic endoscope.* In Exp. Robotics IV. 4th Intl. Symp., ed. O Khatib, JK Salisbury, 1995, 161–9. Berlin: Springer-Verlag.
- Steigenberger02** Steigenberger, J.; Zimmermann, K.; Zeidis, I.: *Mathematical Model of Worm like Motion Systems with Finite and Infinite Degree of Freedom. Theory and Practice of Robots and Manipulators.* Proc. of the 14<sup>th</sup> CISM IFToMM Symposium (RoManSy 14), 2002, 507-516.
- Steigenberger03a** Zimmermann, K.; Zeidis, I.; Steigenberger, J.: *On artificial worms as chain of mass points.* Proc. of the 6th Int.Conference of Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2003), Catania, 2003, 11-18.
- Steigenberger03b** Steigenberger, J.; Zimmermann, K.; Zeidis, I.; Huang Jianjun: *An approach to the modelling of worm-like motionsystems with finite degree of freedom – First steps in technical realization.* PAMM. Proc. Appl. Math. Mech. Vol. 2 (2003)1, 529-530.
- Steigenberger04** Steigenberger, J.: *Modeling artificial worms*, Preprint M02/04, 2004, Institut für Mathematik, TU Ilmenau.

- Steigenberger05** Steigenberger, J.; Behn, C.; Zimmermann, K.; Abaza, K.: *Worm-like Locomotion – Theory, Control and Application*, Tagungsunterlagen 3rd International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines (AMAM), Ilmenau (Deutschland), Herausgeber: Rektor der TU Ilmenau, elektronische Veröffentlichung, 6 Seiten, 2005.
- Till90** Till, T.; Beisel, D: *Lebenselemente. Erde. Wasser. Feuer. Luft*. Umweltstiftung WWF Deutschland (Hrsg.), Pro Futura Verlag, München, 1990, 256 Seiten.
- Ute02** Ute, J.; Ono, K.: *Fast and efficient locomotion of a snake robot based on self excitation principle*. In: Proceedings of the 7th International Workshop on Advanced Motion Control. IEEE, July 2002, 532-539.
- Walton90** Walton, M.; Jayne, B. C.; Bennett, A. F.: *The energetic cost of limbless locomotion*. *Science*, Aug. 3, 1990., 524-527.
- Weise02** Weise, F.: *Entwurf und Konstruktion einer neuartigen Aktuatorik für ein biomimetisches Bewegungssystem*. Diplomarbeit, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, 2002.
- Westheide96** Westheide, W. und Rieger, R.: *Spezielle Zoologie - Erster Teil: Einzeller und Wirbellose Tiere*. Gustav Fischer Verlag, 1996, Stuttgart.
- Wilbur02** Wilbur, C.; Vorus, W.; Cao, Y. and Currie, S.N.: *Neurotechnology for biomimetic robots*, chapter A Lamprey-Based Undulatory Vehicle. Bradford/MIT Press, Cambridge London, 2002.
- Wilcox04** Wilcox, B.: *Gas pipe explorer robot* United States Patent Nr. 6,697,710 February 24, 2004.
- Witte00** Witte, H.; Fischer, M. S.; Schilling, N.; Ilg, W.; Dillmann, R.; Eckert, M.; & Wittenburg, J.: *Konstruktion vierbeiniger Laufmaschinen anhand biologischer Vorbilder*. - Konstruktion 9-2000: 46 - 50.
- Witte03** WITTE, H.; & SCHILLING, C.: *Biologische Inspiration oligopedaler Laufmaschinen*. In: Wisser, A. & Nachtigall, W. (Hrsg.) , BIONA-Report 16, Akad. Wiss. Lit., Mainz. GTBB, Saarbrücken, 2003, 130-139.
- Worst98** Worst, R.: *Robotic snakes*. Proceedings of the Third German Workshop on Artificial Life, Verlag: Harri Deutsch, 1998, 113-126, ISBN: 3-8171-1591-1.
- www1** Free online Dictionary: <http://www.thefreedictionary.com/gait>
- www2** Biology-Online.org dictionary:  
<http://www.biology-online.org/dictionary/locomotion>
- www3** Online Medical Dictionary and Glossary with medical definitions:  
<http://www.medterms.com/script/main/art.asp?articlekey=4190>



- 
- Yeo00** Yeo, S.H.; Chen, I.-M.; Senanayake, R. S.; Wong P. S.: *Design and Development of a Planar Inchworm Robot*. 17th IAARC Int. Symp. Automation Robotics in Construction, Taipei, 2000.
- Zimmermann04a** Zimmermann, K.; Zeidis, I.: *An approach to worm like locomotion*. XXI International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Warsaw, Poland, August 15-21, 2004, Book of abstracts, 371.
- Zimmermann04b** Zimmermann, K.; Zeidis, I.; Naletova, V.; Turkov, V.: *Waves on the surface of a magnetic fluid layer in a travelling magnetic field*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 268 (2004) 1-2, 227-231.
- Zimmermann04c** Zimmermann, K.; Zeidis, I.: *Mathematical models and prototypes of worm-like motion systems using magnetic materials*. Theory and Practice of Robots and Manipulators, Proc. of the 15th CISM IFToMM Symposium (RoManSy 15), Montreal, 2004
- Zimmermann04d** Zimmermann, K.; Zeidis, I.; Naletova, V.; Turkov, V.: *Travelling wave on a free surface of a magnetic fluid layer*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Special issue: Proceedings of the International Conference on Magnetism (ICM 2003) - Edited by D. Fiorani and L. Pareti, 272-276 (2004), 2343-2344.
- Zimmermann05** Zimmermann, K.; Zeidis, I.; Pivovarov, M.; Abaza, K.: *Forced nonlinear oscillator with nonsymmetric dry friction*. 8<sup>th</sup> conference on dynamical systems – Theory and Applications, Łódź, Poland, December 12-15, 2005, Vol.1, ISBN: 83-920409-1-0



# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meines fast vierjährigen Promotionsstudiums im Fachgebiet Technische Mechanik an der Fakultät Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau.

Dem Betreuer dieser Arbeit, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. K. Zimmermann, der alle Werte des Wortes „Doktorvater“ besitzt, gilt mein erster Dank. Ohne seine allseitige Unterstützung wäre diese Arbeit nie entstanden.

Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. (i.R.) J. Steigenberger, Herrn Dr. rer. nat. I. Zeidis, Herrn Doz. Dr. V. I. Lysenko und Herrn Doz. Dr. V. T. Menchenija für zahlreiche Gespräche, wertvolle Hinweise und die Erlaubnis zur Aufnahme von gemeinsam erzielten Forschungsergebnissen in diese Arbeit.

Den Herrn Dipl.-Phys. K.H. Müseler und den Herrn Dipl.-Ing. R. Weber danke ich für foto- und videotechnische Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt meinen Kolleginnen Frau Dipl.-Ing. S. Stauche und Frau Dipl.-Ing. K. Aslanski und meinem Kollegen Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Math. C. Behn, die mit mir ein Arbeitszimmer geteilt und mich menschlich sowie sprachlich und bei der Bearbeitung einiger Bilder dieser Arbeit unterstützt haben. Ihr seid wahre Freunde.

Ich möchte mich besonders bei Herrn Dipl.-Ing. P. Walkling für die wesentliche Hilfe bei der Konstruktion und dem Aufbau der Prototypen und bei Frau Dipl.-Ing. H. Sachse für die zahlreichen Zeichnungen in dieser Arbeit bedanken.

Desweiteren möchte ich allen nicht genannten Kolleginnen und Kollegen, die mir bei dieser Arbeit geholfen haben, danken.

Weiterhin gilt mein Dank dem Land Thüringen und der Vergabekommission der Landesgraduiertenförderung an der TU Ilmenau für die zweijährige finanzielle Unterstützung.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern und bei der, nach meiner Mutter, zweitwichtigsten Frau meines Lebens, Fidaa, für ihre Geduld und Unterstützung in der Zeit meiner Promotion bedanken. Ich liebe Euch.

**Danke Deutschland!**



## Thesen zur Dissertation

- Die gerichtete Ortsveränderung natürlicher oder technischer Systeme ist generell als **Lokomotion** zu verstehen, aber es erweist sich als schwierig, eine aus Sicht der Mechanik umfassende Definition des Begriffes Lokomotion zu geben.
- Lokomotionssysteme sind technische Systeme, die in der Lage sind, alle ihre Punkte in einem ausgewählten charakteristischen Zeitintervall zu bewegen, wobei durchaus Größe und Richtung der Lageänderung der Punkte verschieden sein können. Die Verschiebung des Massenmittelpunktes oder die mittlere Verschiebung aller Punkte des Körpers zur Zeit sind als Maß für solche Bewegung zu verstehen.
- **Undulation** ist ein spezielles Fortbewegungsprinzip, das nicht im engen Sinne einer wellenförmigen Bewegung, wie in der Biologie üblich, gebraucht werden soll.
- Die Mechanik versteht unter Undulation die Bewegung durch eine Erregung der Aktuatoren des Systems, die sowohl von außen kommen oder im Inneren erzeugt werden kann. Der Aktuator erzeugt seinerseits eine in der Regel periodische Gestaltänderung, welche durch die Wechselwirkung mit der Umgebung eine globale Lageänderung erzeugt.
- In der vorliegenden Arbeit wurden undulatorische Lokomotionssysteme theoretisch und mittels zweier entwickelter experimentell Prototypen untersucht.
- Der TM-ROBOT wurde nach dem undulatorischen Bewegungsprinzip des Regenwurms (Längenänderung von Segmenten) aufgebaut. Ein Bewegungssystem, das für die Bewegung das peristaltische Bewegungsprinzip nutzt, bewegt sich mit periodischen Verformungen seines Körpers und nichtsymmetrischen Reibkräften unter Einbeziehung der Wechselwirkung mit der Umgebung.
- Der TM-ROBOT ist mit einer Borstenstruktur (Spikes) aufgebaut, um nichtsymmetrische Reibkräfte zu realisieren. Diese Spikesstruktur erfüllt zwei Aufgaben:
  1. Sie verhindert aufgrund der hinreichend großen Rauigkeit der Struktur negative Geschwindigkeiten der Massen.

2. Sie ermöglicht die Nutzung von neuen Gaits (Bewegungsalgorithmen), die die Geschwindigkeit des Bewegungssystems erhöhen (oder zum Beispiel auch konstant werden lassen können).

Eine bidirektionale Lokomotion des Wurmssystems ist allerdings nicht mehr möglich. Auch eine Lokomotion, bei gleichzeitiger Bewegung aller drei Massenpunkte in einer Richtung, ist unmöglich.

- Für die Realisierung von definierten Bewegungstypen, wurden notwendige Bedingungen im Kontext der Gaits formuliert. In der praktischen Realisierung erfolgen die Längenänderungen durch Kontraktions- oder Extensionskräfte. Diese Bedingungen sind nur für den Fall gültig, wenn die Bewegung aus der Ruhelage beginnt. Unter dieser Voraussetzung sind die ermittelten Bedingungen im Kontext der Kräfte nicht nur notwendig, sondern auch hinreichend.
- Der MINCH-ROBOT, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, ist ein Mikroroboter, der keine klassische undulatorische Lokomotion umsetzt. Er besteht aus einem Piezoaktuator und ist mit zwei passiven Beinen und einem Schwanz ausgerüstet.
- Die Undulation dieses Mikroroboters besteht in der Übertragung von hochfrequenten Schwingungen seines Körpers (Piezoaktuator) auf die Beine. Dadurch werden komplexe räumliche Trajektorien der Beinendpunkte erzeugt.
- Für die Steuerung der Bewegungsrichtung wird die (absichtlich realisierte) Nichtsymmetrie der beiden Beine genutzt. Diese Nichtsymmetrie zwischen rechtem und linkem Bein ist die Ursache für eine Verschiebung der Resonanzbereiche der Beine. Damit wird der Roboter in seiner Richtung steuerbar.
- Die Geschwindigkeit des MINCH-ROBOT steigt mit zunehmender Rauheit der Unterlage. Für jede Schwingungsfrequenz gibt es eine (oder mehrere) Rauheiten, bei der die Geschwindigkeit des Roboters kleiner wird. Periodische Stöße (Sekundärvibrationen) zwischen dem Bein und der Oberfläche ergeben eine Amplitude, die kleiner ist, als die Primäramplitude des Beines aus den Transversal- und Longitudinaleigenschwingformen. Wenn diese Amplitude mit dem Abstand zweier bzw. mehrerer „Spitzen“ der Oberfläche zusammenfällt, wird die Primäramplitude gestört und die Geschwindigkeit reduziert
- Besonders der MINCH-ROBOT bietet eine gute Hardware – Basis, um zukünftig Probleme kooperierender Roboter und Schwarmverhalten zu untersuchen.