

**Felix Becker**

**Zur Mechanik vibrationsgetriebener Roboter für  
terrestrische und aquatische Lokomotion**



**Zur Mechanik vibrationsgetriebener  
Roboter für terrestrische und  
aquatische Lokomotion**

Felix Becker



Universitätsverlag Ilmenau  
2015

## Impressum

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 9. Dezember.2014  
1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Zimmermann  
(Technische Universität Ilmenau)  
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Detlef Riemer  
(Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur, Leipzig)  
3. Gutachter: Prof. Dr. Vladimir T. Minchenya  
(Belarussian National Technical University, Minsk)  
Tag der Verteidigung: 23. April 2015

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** 978-3-86360-124-9 (Druckausgabe)

**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2015000338



# Kurzfassung

Der Gegenstand der Arbeit ist die Mechanik von mobilen Robotern für terrestrische und aquatische Lokomotion. In den untersuchten Systemen wird die periodische Erregung eines inneren Antriebs durch nicht symmetrische Systemeigenschaften in eine gerichtete Fortbewegung gewandelt. Eine zweidimensionale Steuerbarkeit der Systeme wird durch frequenzabhängige mechanische Eigenschaften erreicht. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der mathematisch-mechanischen Beschreibung der Roboter mittels analytischer und numerischer Methoden sowie ihrer experimentellen Untersuchung. Prototypen mobiler Roboter dienen dem funktionellen Nachweis.

Auf Basis von mechanischen Grundlagen werden terrestrische und aquatische Lokomotionsarten vorgestellt und klassifiziert. Mit Blick auf die praktische Realisierung von mobilen Robotern für unterschiedliche Umgebungsbedingungen werden Antriebssysteme in ihrer Eignung als Vibrationsquellen bewertet. Piezoelektrische Antriebe besitzen dabei besonderes Potential. Eine umfassende Analyse des Standes der Technik zeigt die Anwendbarkeit von vibrationsgetriebener Lokomotion für miniaturisierte technische Anwendungen.

Systeme mit Borsten dienen der unidirektionalen terrestrischen Lokomotion. Mittels eines Mehrkörpersystemmodells und experimentellen Untersuchungen werden die verschiedenen Wirkungsmechanismen analysiert. Ein Prototyp für die Fortbewegung in Röhren wird vorgestellt.

Für eine steuerbare zweidimensionale Lokomotion mit nur einem Antrieb müssen die Grenzen von klassischen Starrkörpersystemen überwunden werden. Der verfolgte Lösungsansatz nutzt das frequenzabhängige Schwingungsverhalten von elastischen Systemen, wie Balken oder Platten. Zur Untersuchung werden kontinuumsmechanische Modelle sowie Finite-Elemente-Methoden verwendet und durch experimentelle Untersuchungen erweitert. Die Erkenntnisse werden für die Entwicklung eines programmier- und fernsteuerbaren Prototyps benutzt. Sein Bewegungsverhalten kann durch die Änderung der Antriebsfrequenz auf verschiedenen Untergründen gesteuert werden. Das System erreicht Geschwindigkeiten bis 100 mm/s und kann das Fünffache seiner Masse transportieren.

Abschließend wird ein innovativer Prototyp vorgestellt, der mit einem einzigen Antrieb eine steuerbare Lokomotion auf festem Untergrund und an der Oberfläche von Flüssigkeiten durchführen kann. Das terrestrische und aquatische Bewegungsverhalten wird untersucht und die Tragfähigkeit solcher Systeme auf Basis eines hydrostatischen Modells bestimmt.



# Abstract

This thesis discusses the mechanics of mobile robots for terrestrial and aquatic locomotion. Vibration-driven locomotion systems are characterised by an internal periodic excitation, which is transformed to a directed motion due to asymmetric properties of the system. To perform a two-dimensional and controllable locomotion, mechanical properties of robots are investigated dependent on the frequency of the internal excitation. The mechanical description of the robots is done using analytical and numerical methods and supported by experimental studies. The applicability of the results in mobile robots is proved by prototypes.

On the basis of mechanical fundamentals, terrestrial and aquatic locomotion principles are discussed and classified. Actuators are reviewed. The purpose is to evaluate the performance as vibration sources for terrestrial and aquatic systems. Piezoelectric bending elements are particularly suitable for it. An extensive overview on the state of the art shows the great potential of vibration-driven locomotion systems for miniaturised applications in technics. Systems with bristles can perform unidirectional terrestrial locomotion. Different working principles of bristles are studied based on a rigid body model and experimental investigations. A prototype for the locomotion in tubes is presented.

To perform a controllable two-dimensional locomotion with only one actuator, it is needed to overcome the limits of rigid body systems. The applied approach uses the frequency-dependent vibration behaviour of elastic systems, like beams and plates. Models of continuum mechanics and finite element methods are used and supported by experiments. Based on the investigations, a programmable and remote controlled prototype is developed. The locomotion of it can be controlled on different surfaces by a change of the excitation frequency. The velocity of the prototype is up to 100 mm/s and it can support five times its own weight.

Concluding, an innovative prototype with a single piezoelectric actuator for a controllable locomotion on flat ground and floating in fluids is developed. The terrestrial and aquatic locomotion behaviour of the robot is investigated. The carrying capacity of it is calculated using a hydrostatic model.



# Danksagung

Die vorliegende Forschungsarbeit wurde durch ein Stipendium der Landesgraduiertenförderung des Freistaates Thüringen, das Projekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter Fördernummer ZI 540/11-1 und eine Anstellung im Projekt „SilverMobility - Nahfeldmobilitätskonzepte für die Altersgruppe 50+“, das durch die Thüringer Aufbaubank (TAB) aus Mitteln des Europäischen Stabilitätsfonds (ESF) gefördert wurde, finanziell ermöglicht.

Zahlreiche Personen haben mich während der Bearbeitung des Themas unterstützt und durch ihren selbstlosen Einsatz gefördert. Ihnen gilt mein Dank und meine tiefe Anerkennung.

Besonders meinem Doktorvater K. Zimmermann und meinen unmittelbaren Betreuern V. T. Minchenya, V. Lysenko und I. Zeidis möchte ich meinen Dank aussprechen. Ihre unermüdliche Betreuung und Hilfestellung in fachlichen und privaten Belangen haben diese Arbeit erst möglich gemacht.

Meinen Kollegen des Fachgebietes Technische Mechanik C. Behn, V. Böhm, B. Fiedler, R. Gärtner, E. Gerlach, I. Husung, T. Kästner, T. Kaufhold, H. Kirsten, J. Popp, H. Sachse, H.-P. Walking und C. Will danke ich für ihre Unterstützung.

Weiterhin danken möchte ich T. Stephan von der PI Ceramic GmbH, Lederhose für die Bereitstellung von Materialkennwerten, A. Chigarev von der BNTU Minsk, V. Naletova von der MSU Moskau, C. Buth von der Tetra GmbH, Ilmenau und M. Feierabend, S. Griebel, L. Hartmann, H. Hoppe, E. Lobutova, V. Minchenya und C. Resagk von der TU Ilmenau.

Meinen ehemaligen Studenten B. Bisping, S. Börner, S. Eckstein, S. Feustel, B. Hebestreit, M. Helms, M. Hoder, E. James, C. Keller, T. Lampe, F. Mixanek, A. Wik und A. Zhokhavets möchte ich für ihre wertvolle Zuarbeit im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten meinen Dank aussprechen.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Familie und meinen Freunden, die mir immer zur Seite standen. Besonderer Dank geht an T. Volkova, die mit Geduld und Fachkenntnis in wissenschaftlichen und persönlichen Problemen eine Stütze war.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Mobile Robotik . . . . .	1
1.2	Motivation . . . . .	4
1.3	Ziel . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1	Mathematisch-mechanische Grundlagen . . . . .	7
2.1.1	Mathematische Notation . . . . .	7
2.1.2	Mechanisches Modell . . . . .	7
2.1.3	Mechanische Methoden . . . . .	8
2.1.4	Schwingungen ausgewählter mechanischer Strukturen . . . . .	9
2.2	Lokomotion technischer Systeme . . . . .	11
2.2.1	Definition und Klassifikation . . . . .	11
2.2.2	Aktive und passive Lokomotion . . . . .	12
2.2.3	Vibrationsgetriebene Lokomotion . . . . .	12
2.2.4	Terrestrische Lokomotion . . . . .	13
2.2.5	Aquatische Lokomotion in Flüssigkeiten . . . . .	17
2.2.6	Aquatische Lokomotion an der Flüssigkeitsoberfläche . . . . .	20
2.3	Steuerbarkeit . . . . .	22
2.4	Miniaturisierung . . . . .	22
2.5	Antriebe für vibrationsgetriebene Lokomotion . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>27</b>
3.1	Roboter mit Borsten für terrestrische Lokomotion . . . . .	27
3.1.1	Regenwurmartige Roboter . . . . .	28
3.1.2	„Bristle bots“ . . . . .	29
3.1.3	Anwendungen in der Inspektion und Endoskopie . . . . .	31
3.2	Piezoelektrisch angetriebene Roboter für terrestrische Lokomotion . . . . .	32
3.2.1	Roboter ohne Ausnutzung von Resonanz . . . . .	32
3.2.2	Roboter auf Basis resonanter Kontinuumsschwingungen . . . . .	34
3.3	Amphibische Roboter . . . . .	39
3.3.1	Wasserläuferähnliche Roboter . . . . .	39
3.3.2	Basiliskenähnliche Roboter . . . . .	41
3.4	Folgerungen aus dem Stand der Technik . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Terrestrische Roboter mit Borsten für unidirektionale Lokomotion</b>	<b>43</b>
4.1	Mechanisches Modell einsegmentiger Roboter mit Borsten . . . . .	44
4.2	Simulation des Mehrkörpermodells und Diskussion der Ergebnisse . . . . .	47

## Inhaltsverzeichnis

4.2.1	Aufbau und Bewegungsverhalten von Modell I . . . . .	47
4.2.2	Aufbau und Bewegungsverhalten von Modell II . . . . .	48
4.2.3	Parameterstudien zur Geschwindigkeit beider Modelle . . . . .	50
4.3	Aufbau des Experimentalsystems mit Borsten . . . . .	52
4.4	Experimentelle Untersuchungen des Systems mit Borsten . . . . .	53
4.4.1	Bewegungsverhalten des Systems mit Borsten . . . . .	53
4.4.2	Parameterstudien zur Geschwindigkeit des Systems mit Borsten . . . . .	55
4.5	Zusammenfassung vibrationsgetriebener Roboter mit Borsten . . . . .	57
4.6	Prototyp für die Fortbewegung in Röhren . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb</b>	<b>61</b>
5.1	Modellbasierte Untersuchung eines Starrkörpersystems . . . . .	63
5.1.1	Modellierung als Massenpunktmodell . . . . .	63
5.1.2	Simulation des Massenpunktmodells . . . . .	66
5.2	Statische und dynamische Untersuchung des Antriebselements . . . . .	69
5.2.1	Biegesteifigkeit von Laminaten . . . . .	70
5.2.2	Piezoelektrisches Biegemoment . . . . .	72
5.2.3	Auslenkung des Aktors bei konstanter elektrischer Spannung . . . . .	75
5.2.4	Vergleich der Auslenkung des Aktors . . . . .	78
5.2.5	Eigenkreisfrequenzen einer elastisch gelagerten Kreisplatte . . . . .	79
5.2.6	Experimentelle dynamische Analyse des Aktors . . . . .	82
5.2.7	Ausblick zur Anwendung der Aktoren in mobilen Robotern . . . . .	86
5.3	Dynamische Untersuchung der Übertragungselemente . . . . .	87
5.3.1	Analytische Betrachtung der freien Schwingung des geraden Balkens . . . . .	89
5.3.2	FE-Berechnung der freien Schwingungen des geraden und gekrümmten Balkens . . . . .	90
5.3.3	Analytische Betrachtung der erzwungenen Schwingungen des geraden Balkens . . . . .	92
5.3.4	FE-Betrachtung der erzwungenen Schwingungen des gekrümmten Balkens . . . . .	94
5.3.5	Experimentelle Betrachtung der erzwungenen Schwingungen von gekrümmten Balken . . . . .	96
5.3.6	Ausblick zur Anwendung der Übertragungselemente in mobilen Robotern . . . . .	99
5.4	Gesamtsystem aus Antriebselement und Übertragungselementen . . . . .	100
5.4.1	Aufbau des Gesamtsystems und des FE-Modells . . . . .	100
5.4.2	Messaufbau und Digitalisierung . . . . .	101
5.4.3	Untersuchung der Bewegung des Gesamtsystems . . . . .	102
5.5	Programmierbarer, fernsteuerbarer Prototyp „Beetle-Robot“ . . . . .	108
5.5.1	Aufbau und Funktionsweise des „Beetle-Robot“ . . . . .	108
5.5.2	Bewegungsstudien mit dem „Beetle-Robot“ . . . . .	109
5.6	Zusammenfassung terrestrischer Roboter mit hochfrequenten Antrieb . . . . .	113
<b>6</b>	<b>Prototyp für die amphibische Lokomotion</b>	<b>115</b>
6.1	Statische Betrachtung des amphibischen Prototyps . . . . .	117
6.1.1	Herleitung der Tragfähigkeitsberechnungen . . . . .	117



6.1.2	Berechnung von Tragfähigkeit und charakteristischen Kennzahlen . . . . .	121
6.2	Experimentelle Untersuchung des Bewegungsverhaltens . . . . .	123
6.2.1	Terrestrische Lokomotion des amphibischen Prototyps . . . . .	123
6.2.2	Aquatische Lokomotion des amphibischen Prototyps . . . . .	124
6.3	Zusammenfassung der Untersuchungen des amphibischen Prototyps . . . . .	127
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>129</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	129
7.2	Ausblick . . . . .	131
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>133</b>
A.1	Kennwerte der Antriebssysteme . . . . .	133
A.2	Beschreibung des Pendelkraftmesssystems . . . . .	135
A.3	Materialkennwerte der Piezokeramik für die numerischen Untersuchungen . . . . .	136
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>137</b>



# Verwendete Symbole

$A$	Flächeninhalt, Amplitude einer periodischen Funktion
$a$	Längenverhältnis
$B, b$	Breite
$Ba$	Baudoin-Zahl
$Bo$	Bond-Zahl
$C$	Konstante, Mittelpunkt, Steifigkeitsmatrix
$c, c_t$	Federsteifigkeit
$c_W$	Strömungswiderstandskoeffizient
$\vec{D}$	Drehimpuls
$D$	Dissipationsfunktion, Dämpfungsgrad, Durchmesser
$d$	Durchmesser
$E$	Elastizitätsmodul, Parameter der Differentialgeometrie
$\vec{e}$	Einheitsvektor
$e$	Elastizitätsmodulverhältnis, Exzentrizität
$\vec{F}$	Kraft
$F$	Betrag einer Kraft, Parameter der Differentialgeometrie
$Fr$	Froude-Zahl
$f$	Frequenz
$G$	Parameter der Differentialgeometrie
$\vec{g}, g$	Erdbeschleunigung
$H, h$	Höhe
$I_0, I_1$	Modifizierte Bessel-Funktion erster Gattung, nullter und erster Ordnung
$I_z$	Äquatoriales Flächenträgheitsmoment
$i, j, k, l$	Zählvariablen (als Indizes)
$J$	Massenträgheitsmoment, Massenträgheitstensor
$J_0, J_1$	Bessel-Funktion erster Gattung, nullter und erster Ordnung
$K$	Dämpfungsmatrix
$K, k$	Krümmung
$K_0$	Modifizierte Bessel-Funktion zweiter Gattung, nullter Ordnung
$k$	Dämpfungskonstante, Konstante viskoser Reibung, Stoßzahl
$L$	Lagrange-Funktion, Parameter der Differentialgeometrie
$L, l$	Länge
$L_c$	Charakteristische Länge
$\vec{M}$	Moment
$M$	Betrag eines Moments, Parameter der Differentialgeometrie, Massenmatrix
$m$	Masse
$\vec{N}$	Normalkraft

## Verwendete Symbole

$N$	Betrag einer Normalkraft, Plattensteifigkeit, Anzahl, Parameter der Differentialgeometrie, Drehzahl
$\vec{n}$	Normalenvektor
$n$	Anzahl
$P$	Punkt
$\vec{p}$	Impuls
$\vec{p}, p$	Druck
$\vec{Q}$	Querkraft
$Q$	Betrag einer Querkraft, Verallgemeinerte Kraft
$q$	Verallgemeinerte Koordinate
$R, r$	Radius
$R_a, R_z$	Arithmetischer Mittelrauwert, Gemittelte Rautiefe
$Re$	Reynolds-Zahl
$\vec{r}$	Ortsvektor
$(r, \psi, z)$	Zylindrische Koordinaten
$s$	Bogenlänge, Skalierungsfaktor
$T$	Periodendauer, Zeitpunkt, Zeitintervall, Kinetische Energie, Zeitabhängige Funktion
$t$	Zeit
$u$	Verschiebung in $x$ - oder $r$ -Richtung, Parameter der Differentialgeometrie
$V$	Volumen
$\vec{v}$	Geschwindigkeit
$v$	Betrag einer Geschwindigkeit, Verschiebung in $y$ -Richtung, Parameter der Differentialgeometrie
$v_c$	Charakteristische Geschwindigkeit
$W$	Ortsabhängige Funktion
$w$	Verschiebung in $z$ -Richtung
$X$	„Langsame Verschiebung“, Ortsabhängige Funktion
$(x, y, z)$	Kartesische Koordinaten
$Y_0$	Bessel-Funktion zweiter Gattung, nullter Ordnung
$\vec{Z}$	Zwangskraft
$Z$	Betrag einer Zwangskraft

$\alpha, \beta, \gamma$	Winkel
$\beta_j$	Dämpfungskoeffizient in FE-Simulationen
$\Delta$	Laplace-Operator, Differenz
$\varepsilon$	Positive reelle Zahl $\ll 1$ , Mechanische Dehnung
$\eta$	Dynamische Viskosität, Lineare Koordinate, Plattensteifigkeitsverhältnis
$\theta$	Kontaktwinkel
$\kappa$	Verhältniswert
$\Lambda$	Eigenwert
$\lambda$	Wellenlänge, Eigenwert
$\mu$	Koeffizient trockener (Coulombscher) Reibung
$\nu$	Querkontraktionszahl, Kinematische Viskosität
$\xi$	Lineare Koordinate, „Schnelle Verschiebung“
$\pi$	Kreiszahl
$\rho$	Dichte
$\sigma$	Mechanische Normalspannung, Oberflächenspannung
$\tau$	Dimensionslose Zeit, „Schnelle Zeit“
$\varphi$	Winkel
$\chi$	Radienverhältnis
$\psi$	Winkel
$\Omega$	Erregungskreisfrequenz
$\omega$	Eigenkreisfrequenz
$a^*$	Dimensionslose Größen
$\tilde{a}$	Längenbezogene Größen
$\vec{a}$	Vektorielle Größen
$\nabla$	Nabla-Operator



# Abkürzungsverzeichnis

1D, 2D, 3D	ein-, zwei-, dreidimensional
Abb.	Abbildung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
Akku	Akkumulator
ca.	circa
dt.	deutsch
E-Modul	Elastizitätsmodul
engl.	englisch
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
FGL	Formgedächtnislegierung
FPS	Bilder pro Sekunde (engl. frames per second)
Gl.	Gleichung
IPMV	Ionischer Polymer-Metall-Verbund
LED	Leuchtdiode (engl. light emitting diode)
MPM	Massenpunktmodell
NN	Nullniveau
Nr.	Nummer
NiTi	Nickel-Titan
PE	Polyethylen
PM	Piezo-Metall
PTFE	Polytetrafluoroethylen
PVDF-TrFE	Polyvinylidenfluorid Trifluoroethylen
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat
Tab.	Tabelle
u. a.	unter anderem
USB	universeller serieller Bus (engl. universal serial bus)
z. B.	zum Beispiel





# 1 Einleitung

Im vorliegenden Kapitel wird eine Einleitung und eine Eingrenzung der Thematik der Dissertation im Forschungsgebiet der mobilen Robotik gegeben. Die konkrete Zielsetzung des Autors wird motiviert und formuliert.

Ein Roboter ist ein „automatisch gesteuertes, mechanisches System zur Ausführung von Bewegungsvorgängen wie Handhabung von Objekten und Lokomotion“ [IFT12]. Diese Definition aus dem „IFTtoMM dictionaries online“ zeigt, dass Roboter Maschinen mit Informationsverarbeitung sind, die Bewegungen ohne den Eingriff von Menschen selbständig durchführen können. Stationäre Roboter, wie Industrieroboter, arbeiten in einem „stark strukturierten und streng kontrollierten Umfeld“ [Neh02]. Er wird als Arbeitsraum bezeichnet.

## 1.1 Mobile Robotik

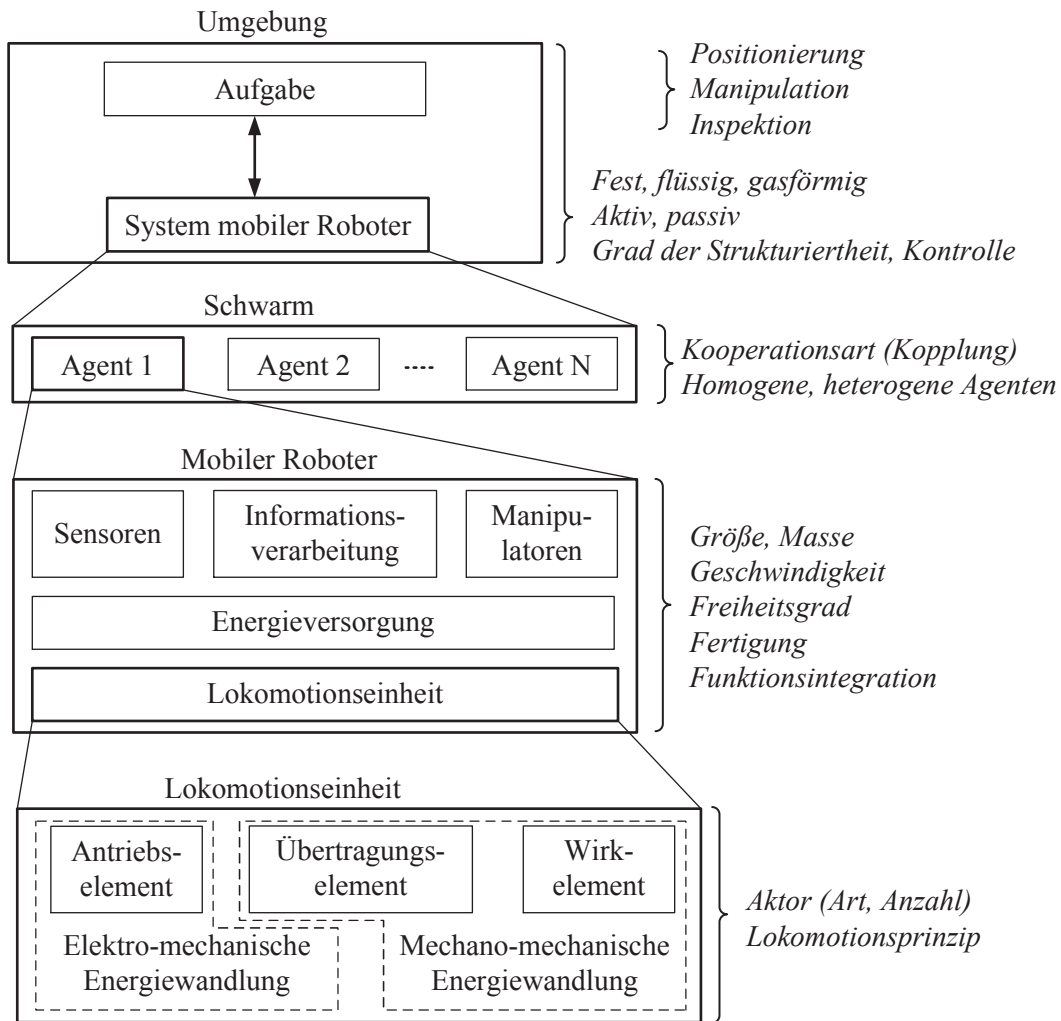
Mobile Roboter können sich fortbewegen und besitzen somit einen vergrößerten Arbeitsraum. Das kann dazu führen, dass sie in teilstrukturierten oder unbekanntem Umfeld ihre Aufgaben verrichten müssen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf fester und flüssiger Umgebung, welche eine strukturierte und kontrollierte Gestalt besitzt (Laborbedingungen). Die Umgebung ist rein passiv, was bedeutet, dass die Antriebskräfte durch den Roboter selbst erzeugt werden. In Abb. 1.1 ist der funktionelle Aufbau eines mobilen Robotersystems im Kontext seiner Umgebung und Aufgaben dargestellt.

Die Aufgaben mobiler Roboter können in die Bereiche Positionierung (Transport), Manipulation und Inspektion unterteilt werden. Während für die Positionierung, die in dieser Arbeit betrachtet wird, lediglich eine kontrollierte Fortbewegung erzeugt werden muss, steht bei der Inspektion die Informationsgewinnung im Vordergrund. Im Gegensatz dazu wird bei der Manipulation die Umgebung zielgerichtet beeinflusst.

Eine Anzahl mobiler Roboter, die die Fähigkeit besitzen, koordiniert zu agieren, wird, in Anlehnung an die Biologie, als ein Schwarm bezeichnet. Der einzelne Roboter in einem Schwarm ist ein Agent. Die Struktur oder Architektur des Schwarms ist abhängig von der Art der Kooperation und der Gestaltung der Agenten. Schwärme aus gleichartigen Agenten werden homogen genannt. Heterogene Schwärme bestehen aus unterschiedlichen Robotern. Die Kooperation in einem Schwarm wird meist durch Informationsübertragung und -verarbeitung (Kommunikation) gewährleistet. Die Qualität der Kooperation und die Fähigkeiten der einzelnen Agenten werden unter dem Begriff Schwarmintelligenz zusammengefasst. Roboterschwärme werden in [Dud96], [Cao97], [Bay07], [Moh09], [Bra13], [Rub14] betrachtet. In dieser Arbeit wird nicht weiter darauf eingegangen.

Ein mobiler Roboter (Agent) ist u. a. durch seine Größe und Masse gekennzeichnet. Die geometrischen Abmessungen eines Roboters werden häufig zur Klassifizierung verwendet. Zur Einordnung kommen die Präfixe makro, meso, mini, mikro und nano zum Einsatz.

# 1 Einleitung



**Abb. 1.1:** Funktionsebenen mobiler Robotersysteme im Kontext ihrer Aufgaben und Umgebung (N - Anzahl der Agenten)



**Abb. 1.2:** Klassifikation mobiler Roboter in Abhängigkeit ihrer Funktionsintegration nach [Ebe02] (IV - Informationsverarbeitung, Steuerungseinheit; EV - Energieversorgung; LE - Lokomotionseinheit; MA - Manipulatoren)

Vereinzelt wird von miniaturisierten Systemen gesprochen. Die Anwendung dieser Größenbezeichnungen in der Literatur ist nicht konsistent. Roboter mit einer charakteristischen Länge im Bereich von Millimetern oder Zentimetern werden als mini, mikro oder miniaturisiert bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit werden das Volumen eines Roboters und seine Geschwindigkeit als charakteristische Größen gewählt. Die Komplexität bei der Miniaturisierung eines mechatronischen Systems ändert sich proportional zum Volumen [Cap03]. Fokussiert wird auf Roboter im Größenbereich von  $10 \text{ cm}^3$  bis  $100 \text{ cm}^3$ . Die Fertigung eines Roboters ist ein wichtiger Kostenfaktor und umschließt die Produktion und Montage seiner Teilsysteme. Eine Möglichkeit zur Klassifikation in Makro-, Mikro- und Nano-Roboter kann anhand der verwendeten Fertigungstechnologien erfolgen.

Als mechatronisches System umfasst ein mobiler Roboter im Allgemeinen Teilsysteme zur Informationsgewinnung (Sensoren), Informationsverarbeitung und -übertragung, Manipulatoren, ein Lokomotionssystem und eine Energieversorgung. Die Autonomie des Systems ist abhängig davon, welche dieser Funktionen im Roboter integriert sind oder extern bereitgestellt werden. In [Ebe02] ist eine beispielhafte funktionspezifische Klassifizierung von Mikrorobotern gegeben, die in Abb. 1.2 verkürzt dargestellt ist.

In dieser Arbeit wird die Erzeugung von Fortbewegung betrachtet. Die Erfüllung dieser Funktion wird durch Antriebs-, Übertragungs- und Wirkelemente gewährleistet. Stand der Technik für Systeme der betrachteten Größenordnung ist eine elektrische Energieversorgung. Durch das Antriebselement wird die elektrische in mechanische Energie gewandelt. Übertragungs- und Wirkelement dienen der Erzeugung von Lokomotion und sind mechanische Energiewandler. Während das Wirkelement die Kopplung zwischen Roboter und Umgebung realisiert, verbindet das Übertragungselement Antriebs- und Wirkelement. Zur Fortbewegungserzeugung können verschiedene Lokomotionsprinzipien zur Anwendung kommen.

## 1.2 Motivation

Klassische mobile Roboter sind häufig Systeme starrer Körper, die mit Gelenken verbunden und beweglich zum Fundament gelagert sind. Die Änderung der Relativlagen erfolgt durch Antriebe in den Koppelstellen [Zim09a]. Zur Fortbewegung bezüglich ihrer festen oder flüssigen Umgebung dienen Räder, Beine, Propeller oder Strahlantriebe.

Neue Aufgabenfelder, besonders in den Gebieten der Produktionstechnik (Manipulation und Montage von Bauteilen aus der Mikrofertigung), Medizin (Medikamententransport, minimalinvasive Chirurgie, Endoskopie des Blutkreislaufs-, Nerven- oder Harnsystems), Biologie (Handhabung einzelner Zellen, Injektion von Flüssigkeiten in Zellen) und Wartungstechnik (Inspektion schwer zugänglicher technischer Räume, wie komplexen Rohrsystemen), zeigen die begrenzte Anwendbarkeit herkömmlicher Roboter [Abb07], [Fir10], [Sah10], [Nel10], [Dil13]. Systeme werden benötigt, die sich durch:

- eine geringe Masse und Größe,
- minimale Kosten für Produktion und Betrieb,
- einen großen Arbeitsraum und
- eine lange Einsatzdauer

auszeichnen. Etablierte Systeme können den neuen Herausforderungen nur begrenzt angepasst werden. Resultierend aus der Skalierung der wirkenden physikalischen Effekte ist die Miniaturisierung klassischer Antriebe und gelenkiger Verbindungen begrenzt. Das Verhältnis von Kosten für Fertigung und Montage zu den geometrischen Abmessungen des Systems steigt beträchtlich bei der Verkleinerung. Gleiches gilt für den Energieverbrauch des Roboters im Betrieb. Um komplexe, mehrdimensionale Bewegungsabläufe zu realisieren, werden meist mehrere Antriebe benötigt, welche Energie verbrauchen und koordiniert gesteuert werden müssen.

Die Natur hat Systeme hervorgebracht, die sich in fast allen natürlichen Umgebungen effektiv und energieeffizient fortbewegen können. Forschungen im Rahmen der Bionik orientieren sich an diesen natürlichen Beispielen [Lep13]. Blickhan et al. haben aus Sicht der Biomechanik des Laufens das Prinzip „intelligence by mechanics“ [Bli07] formuliert. Laufen erfordert einen hohen Informationsverarbeitungsaufwand. Die Idee von Blickhan et al. ist es, diesen durch angepasste mechanische Strukturen zu reduzieren und somit einen Teil der „Intelligenz des Systems“ in sie zu integrieren. An diesem Ansatz orientiert sich der Autor der vorliegenden Arbeit.

## 1.3 Ziel

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Ansatz „intelligence by mechanics“ auf terrestrische und aquatische Lokomotionsarten für mobile Roboter zu übertragen. Als Antrieb sollen hochfrequente innere Schwingungen dienen, die durch nicht symmetrische Systemeigenschaften zu einer Ortsveränderung führen. Dabei sollen die elastischen Eigenschaften von mechanischen Strukturen, wie Balken oder Platten, ausgenutzt werden, um Systeme zu erarbeiten, die durch ein einziges Steuerungssignal kontrolliert werden können. Der Schwerpunkt liegt auf der mathematisch-mechanischen Beschreibung von vibrationsgetriebenen Lokomotionssystemen. Numerische Methoden und experimentelle Untersuchungen erweitern die analytischen Betrachtungen. Prototypen mobiler Roboter dienen dem funktionellen Nachweis.

In der folgenden Tab. 1.1 sind die festgelegten Randbedingungen der Arbeit zusammengefasst. Abb. 1.3 gibt eine Übersicht der Antriebsfrequenzbandbreite und geometrischen Abmessungen der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten vibrationsgetriebenen Prototypen.

**Tab. 1.1:** Zusammenfassung der Randbedingungen der Arbeit

<b>Umgebung:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fest oder flüssig</li> <li>• Strukturiert, kontrolliert (Laborbedingungen)</li> <li>• Rein passiv</li> </ul>
<b>Aufgabe:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Positionierung → Lokomotion</li> </ul>
<b>Mobiles System:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einzelner Roboter (kein Schwarm)</li> <li>• Größe: 10 cm<sup>3</sup> bis 100 cm<sup>3</sup></li> </ul>
<b>Lokomotionseinheit:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Neuartig (keine klassischen Starrkörpersysteme)</li> <li>• Antrieb zur Miniaturisierung geeignet</li> <li>• „Intelligenz des Systems“ (Steuerbarkeit) in Mechanik</li> <li>• Vibrationsgetriebene Fortbewegung</li> </ul>

Das Thema wird aufbauend auf einem Grundlagenkapitel und dem Stand der Technik zu vibrationsgetriebenen mobilen Robotern bearbeitet. Die Arbeit schließt mit Zusammenfassung und Ausblick.

# 1 Einleitung

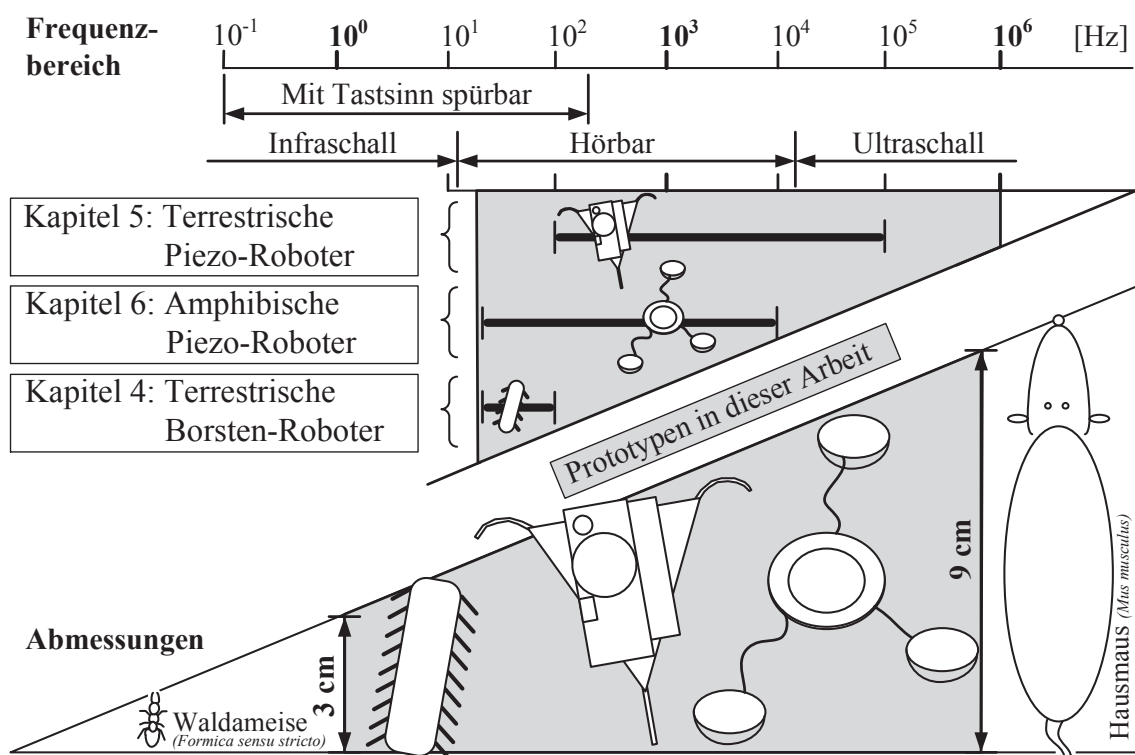


Abb. 1.3: Übersicht über den betrachteten Frequenz- und Größenbereich dieser Arbeit

## 2 Grundlagen

Ziel des Kapitels ist es, die Grundlagen für die Bearbeitung des Themas zu beschreiben. Es werden die verwendeten mechanischen Modelle und Methoden erläutert und wichtige Begriffe definiert. Die Schwingungstechnik steht im Vordergrund. Terrestrische und aquatische Lokomotionsprinzipien werden aus Sicht der Mechanik beschrieben und klassifiziert. Mit Blick auf die Realisierung mobiler Roboter werden vom Autor ausgewählte Aktoren, die für die vibrationsgetriebene Lokomotion geeignet sind, verglichen und Richtlinien zur Anwendung dieser gegeben.

### 2.1 Mathematisch-mechanische Grundlagen

#### 2.1.1 Mathematische Notation

In dieser Arbeit wird die Matrix-Vektor-Schreibweise verwendet. Vektoren werden mit einem Pfeil gekennzeichnet, Matrizen fett gedruckt. Für partielle Ableitungen gelten die folgenden Abkürzungen

$$\frac{\partial}{\partial x} = \partial_x, \quad \frac{\partial}{\partial t} = \partial_t.$$

Wie in der Mechanik üblich, werden vollständige Ableitungen nach der Zeit durch einen Punkt über der Größe gekennzeichnet. Ableitungen nach dem Ort (z. B.  $x$ ) werden durch einen Strich dargestellt.

#### 2.1.2 Mechanisches Modell

Ein mechanisches System besteht aus Körpern, die physikalisch oder geometrisch gekoppelt sind. Als physikalische Kopplung werden kraftschlüssige Verbindungen wie Federn oder Dämpfer bezeichnet. Geometrische Kopplungen erzeugen kinematische Zwangsbedingungen und senken den Freiheitsgrad eines Körpers. Beispiele hierfür sind Lager und Gelenke. Der Freiheitsgrad gibt die minimale Anzahl der Koordinaten an, die benötigt werden, um die Lage und Orientierung eines Systems bezüglich eines raumfesten Koordinatensystems eindeutig zu beschreiben.

Die Mechanik definiert im Allgemeinen drei Arten von massebehafteten Strukturen: den Massenpunkt, den starren Körper und den elastischen Körper.

##### Massenpunkt

Ein Massenpunkt ist ein Objekt ohne räumliche Ausdehnung, d. h., die Masse  $m$  wird in einem Punkt konzentriert modelliert. Der Massenpunkt kann sich frei oder gezwungen auf Bahnen bewegen und besitzt den Freiheitsgrad drei. In dieser Arbeit werden Massenpunkte verwendet, um Massenkonzentrationen in mechanischen Systemen zu modellieren.

## 2 Grundlagen

### **Starrer Körper**

Ein starrer Körper besitzt eine unveränderliche räumliche Ausdehnung, eine konstante Masse  $m$  und einen konstanten Massenträgheitstensor  $J$ . Bei einer freien räumlichen Bewegung hat der starre Körper den Freiheitsgrad sechs: drei Translations- und drei Rotationsmöglichkeiten. Wird ein mobiler Roboter als starrer Körper modelliert, können Lage und Orientierung im Raum durch sechs Koordinaten beschrieben werden. In dieser Arbeit werden Systeme aus starren Körpern verwendet, um mobile Roboter zu modellieren.

### **Elastischer Körper**

Ein linear-elastischer Körper ist deformierbar. Spannungen und Dehnungen folgen dem Hookeschen Gesetz. In dieser Abstraktionsstufe besteht der Körper aus unendlich vielen, infinitesimal benachbarten Massenelementen und hat dadurch den Freiheitsgrad unendlich. Solche Körper kommen in dieser Arbeit zur Modellierung von schwingungsfähigen Teilsystemen der Roboter zum Einsatz.

### **2.1.3 Mechanische Methoden**

Zur mathematischen Beschreibung der Bewegung der genannten Modelle werden zwei Methoden verwendet. Die synthetische Methode umfasst den Impulssatz bzw. Schwerpunktsatz und den Drehimpulssatz. Die Berechnung erfolgt durch vektorielle Gleichgewichtsbedingungen für jeden freigeschnittenen Teilkörper. Die analytische Methode basiert auf energetischen Betrachtungen des Gesamtsystems und resultiert in einer Anzahl von Bewegungsgleichungen, die dem Freiheitsgrad des Systems entspricht. Verwendet werden u. a. die Lagrangeschen Gleichungen, die in verschiedenen Formen für holonome und nicht holonome Systeme gelten.

### **Impulssatz und Schwerpunktsatz**

Der Impulssatz besagt, dass die zeitliche Änderung des Impulses eines Massenpunktes gleich der Summe der äußeren angreifenden Kräfte ist. Der Schwerpunkt eines starren Körpers bewegt sich so, als ob die Resultierende  $\vec{F}$  der äußeren Kräfte auf die im Schwerpunkt konzentrierte Gesamtmasse wirken würde (Schwerpunktsatz). Der Impuls berechnet sich nach

$$\vec{p} = m\dot{\vec{r}} \quad (2.1)$$

$\vec{r}$  ist der Ortsvektor vom Ursprung eines raumfesten Koordinatensystems zum Schwerpunkt des Körpers bzw. zum Massenpunkt. Damit kann für den Impuls- und Schwerpunktsatz einer konstanten Masse geschrieben werden

$$\dot{\vec{p}} = m\ddot{\vec{r}} = \vec{F}. \quad (2.2)$$



### Drehimpulssatz

Der Drehimpulssatz beschreibt die Drehimpulsänderung eines starren Körpers als Folge der äußeren eingepprägten Momente. In Bezug auf den Ursprung 0 eines raumfesten Koordinatensystems lassen sich Drehimpuls und das Moment eingepprägter Kräfte berechnen:

$$\vec{D}_0 = \int_V \vec{r} \times \dot{\vec{r}} dm, \quad \vec{M}_0 = \int_V \vec{r} \times d\vec{F}, \quad (2.3)$$

wobei  $V$  das Volumen des Körpers und  $\vec{r}$  der Ortsvektor zum Massenelement  $dm$  ist. Der Drehimpulssatz hat für den Koordinatenursprung die Form

$$\dot{\vec{D}}_0 = \vec{M}_0. \quad (2.4)$$

Häufig wird er auch bezüglich des Schwerpunktes eines Systems formuliert.

### Lagrangesche Bewegungsgleichungen

Zur Formulierung der Lagrangeschen Gleichungen 2. Art wird nachfolgend die Lagrange-Funktion  $L$  verwendet, die sich als Differenz aus kinetischer Energie  $T$  und potentieller Energie  $U$  berechnet. Sie ist eine Funktion der verallgemeinerten Koordinaten  $q_1, \dots, q_n$  und verallgemeinerten Geschwindigkeiten  $\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n$ . Dissipative Einflüsse lassen sich durch die Dissipationsfunktion  $D$  erfassen.  $Q_1, \dots, Q_n$  bezeichnen die verallgemeinerten Kräfte, die sich nicht aus einem Potential oder der Dissipationsfunktion herleiten lassen. Die Gleichung hat die Form

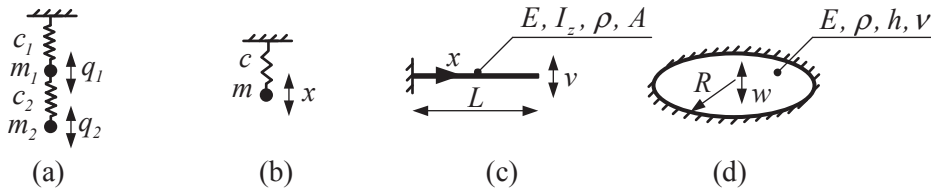
$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = - \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} + Q_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.5)$$

Diese Form der Dynamik-Gleichung wird für holonome Systeme verwendet.

#### 2.1.4 Schwingungen ausgewählter mechanischer Strukturen

Für die Untersuchung von vibrationsgetriebenen Robotern werden Modelle für schwingungsfähige Systeme benötigt. Der Begriff Vibration wird im deutschen Sprachraum gleichberechtigt zum Begriff Schwingung verwendet und folgt damit der Übersetzung des englischen Begriffs „vibration“. Im Kontext dieser Arbeit wird Vibration spezifischer als periodische Schwingung mittlerer bis hoher Frequenz ( $f > 10$  Hz) und kleiner Amplitude ( $A \leq 5$  mm) gebraucht. Zur Untersuchung eines schwingungsfähigen Systems können gekoppelte Anordnungen von Massenpunkten oder starren Körpern verwendet werden, vgl. Abb. 2.1 (a). Die für die Vibration notwendige Elastizität wird in den Koppelementen konzentriert modelliert. Die Bewegung wird durch gewöhnliche Differentialgleichungen erfasst. (2.6) gibt die vektorielle Bewegungsdifferentialgleichung für ein schwingungsfähiges Mehrkörpersystem, wobei  $M$  die Masse-,  $K$  die Dämpfungs- und  $C$  die Steifigkeitsmatrix darstellt. Die Anzahl der Eigenfrequenzen und Eigenformen des Systems ist gleich dem Freiheitsgrad. Die Vereinfachung für ein ungedämpftes System mit dem Freiheitsgrad eins ist in Abb. 2.1 (b) dargestellt. Die Bewegungskordinate ist  $x$ ,  $c$  die Steifigkeit und  $m$  die Masse des Systems. Die Bewegungsdifferentialgleichung des Systems ist in (2.7) gegeben. Aus der Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  lassen sich Eigenfrequenz  $f_0 = \omega_0/2\pi$  und Periodendauer

## 2 Grundlagen



**Abb. 2.1:** Beispiele ungedämpfter elastischer Systeme: (a) - Zweimassenschwinger; (b) - Einmassenschwinger; (c) - Einseitig eingespannter Biegebalken; (d) - Allseitig eingespannte Kreisplatte

$T = 2\pi/\omega_0$  berechnen. Die Kenntnis dieser Größen ist für den Entwurf vibrationsgetriebener mobiler Roboter von besonderer Bedeutung. Der Einfluss von Steifigkeit und Masse auf die Schwingungsgrößen kann qualitativ auf Systeme mit geringerem Abstraktionsgrad und höherem Freiheitsgrad übertragen werden, wie in (2.10) und (2.11) verdeutlicht werden soll.

$$M\ddot{\vec{q}} + K\dot{\vec{q}} + C\vec{q} = \vec{0} \quad (2.6)$$

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (2.7)$$

Zur Beschreibung der Vibration kontinuierlicher Systeme werden Modelle elastischer Elemente, wie Balken, Abb. 2.1 (c), und Platten, Abb. 2.1 (d), verwendet. Sie zeichnen sich durch die kontinuierliche Verteilung von Elastizität und Masse über das Körpervolumen aus, was zu einer unendlichen Anzahl von Eigenfrequenzen und Eigenformen führt. Mittels partieller Differentialgleichungen wird die Schwingung beschrieben. (2.8) ist die Differentialgleichung für die freie Biegeschwingung von Balken.  $v$  bezeichnet die Biegeverformung entlang der Stabachse  $x$ .

$$\rho A \partial_{tt}^2 v + EI_z \partial_{xxxx}^4 v = 0 \quad (2.8)$$

Die Gleichung für die Durchbiegung  $w$  von transversal schwingenden Platten lautet

$$\rho h \partial_{tt}^2 w + N \Delta \Delta w = 0, \quad \text{mit } N = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (2.9)$$

Die Eigenkreisfrequenzen der Biegeschwingungen eines Stabes der Länge  $L$  und einer Kreisplatte mit dem Radius  $R$  werden nach (2.10) und (2.11) bestimmt.

$$\omega_i = C_i \sqrt{\frac{EI_z}{\rho AL^4}} \quad (2.10)$$

$$\omega_i = C_i \sqrt{\frac{N}{\rho h R^4}} \quad (2.11)$$

Dichte  $\rho$ , Elastizitätsmodul  $E$ , Querkontraktionszahl  $\nu$ , Querschnittsfläche  $A$ , äquatoriales Flächenträgheitsmoment  $I_z$  und Höhe  $h$  sind Konstanten, resultierend aus Material und Geometrie des elastischen Elements. Analog zur Steifigkeit  $c$  des Einmassenschwingers repräsentieren  $EI_z$  und  $N$  die Biegesteifigkeiten von Balken und Platte. Die dimensionslosen Parameter  $C_i$  ergeben sich aus der Lagerung, den Rand- und Übergangsbedingungen und der betrachteten Ordnung  $i$  der Eigenschwingungsform.

Die homogenen Differentialgleichungen (2.6), (2.7), (2.8) und (2.9) beschreiben freie Schwingungen. Zur Betrachtung von erzwungenen Schwingungen ist eine zeitlich veränderliche Last  $Q(t)$  auf der rechten Seite der Gleichungen zu ergänzen. Von Bedeutung für diese Arbeit sind nur erzwungene Schwingungen mit periodischer Erregung. (2.12) stellt exemplarisch eine harmonische Erregung mit der Amplitude  $A$  und der Erregungskreisfrequenz  $\Omega$  dar.

$$Q(t) = A \sin(\Omega t) \quad (2.12)$$

## 2.2 Lokomotion technischer Systeme

### 2.2.1 Definition und Klassifikation

Lokomotion ist ein Begriff aus der Biologie und bezeichnet die aktive Fortbewegung von Lebewesen. Dabei werden die Lokomotionsarten Laufen, Klettern, Kriechen, Graben, Schwimmen und Fliegen unterschieden [Zim09a].

In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Lokomotion auf technische Systeme angewandt. Die Bewegungen von Körpern sind in der Mechanik ein zentrales Thema. In der Literatur können zahlreiche Definitionen aus der Sicht der Mechanik gefunden werden. Eine ausführliche Diskussion dieser wird von Steigenberger in [Ste11] gegeben. Die Notwendigkeit der Betrachtung eines charakteristischen Zeitintervalls  $T$ , um eine Definition auf ein konkretes System anzuwenden, wird in [Aba07] besprochen. Jede Definition ist im Kontext ihrer Anwendung und den Zielen ihrer Autoren formuliert. Eine allgemeine Gültigkeit existiert nicht.

**Definition:** In dieser Arbeit wird der Begriff Lokomotion als „die, durch die stetige Veränderung der Lage des Massenmittelpunktes gekennzeichnete Ortsveränderung eines natürlichen oder technischen Systems einschließlich seiner Kontaktflächen bezüglich seiner Umgebung“ [Hua02] definiert.

Zur Erzeugung von Lokomotion müssen antreibende Kräfte  $F_A$  zwischen System und Umgebung wirken. Widerstandskräfte  $F_W$  hemmen die Bewegung. Am Beispiel eines Massenpunktes mit konstanter Masse  $m$  ergibt sich mit dem Impulssatz (2.2)

$$m\ddot{\vec{r}} = \vec{F}_W + \vec{F}_A. \quad (2.13)$$

Wenn  $\frac{|\vec{F}_A| - |\vec{F}_W|}{m} \neq 0$  erfährt das System die Beschleunigung  $\ddot{\vec{r}}$ .

Die Erzeugung der antreibenden Kräfte bildet für diese Arbeit den Ausgangspunkt der Betrachtungen. Aktive vibrationsgetriebene Lokomotion wird besprochen und in terrestrische und aquatische Lokomotion unterschieden.

### 2.2.2 Aktive und passive Lokomotion

Anhand des Ortes, an welchem die antreibenden Kräfte erzeugt werden, erfolgt die Unterteilung in passive und aktive Lokomotion. Bei passiver Lokomotion liegt der Ursprung der Kraft außerhalb der Systemgrenzen. Sie kann technisch durch eine zielgerichtete Anpassung der Umgebungsparameter erzeugt werden. Beispiele sind vibrierende oder geneigte Untergründe, Fluidströmungen oder Magnetfelder. Passive Lokomotion wird in dieser Arbeit nicht betrachtet. Bei aktiven Lokomotionssystemen ist die Ursache der Ortsveränderung innerhalb der Systemgrenzen zu finden. Die benötigte Energie kann von außen zugeführt werden.

### 2.2.3 Vibrationsgetriebene Lokomotion

Sind innere Schwingungen die Ursache der Bewegung, wird, nach Ostrowski et al. [Ost95] bzw. Steigenberger [Ste11], von undulatorischer oder vibrationsgetriebener Lokomotion gesprochen. Vibrationsgetriebene Lokomotionssysteme sind durch eine Überlagerung von „schnellen“ Antriebsschwingungen und einer „langsamen“ Ortsveränderung gekennzeichnet. Nach Blekhman [Ble00] kann die Unterteilung anhand der Schwingungsdauer in einem spezifischen Zeitintervall vorgenommen werden. Für den eindimensionalen Fall ist der Zusammenhang in (2.14) dargestellt, wobei  $x$  die Verschiebung des Gesamtsystemschwerpunktes in raumfesten kartesischen Koordinaten,  $X$  die „langsame“ und  $\xi$  die „schnelle“ Komponente darstellen.

$$x = X + \xi \quad (2.14)$$

Anders als  $X$ , ist  $\xi$  nicht nur von der Zeit  $t$  abhängig, sondern außerdem von der „schnellen“ Zeit  $\tau = \Omega t$ .  $\Omega$  ist die Kreisfrequenz der Schwingung.  $\xi$  ist periodisch mit  $T = 2\pi/\Omega$ . Es wird vorausgesetzt, dass

$$\frac{1}{T} \int_0^T \xi(t, \tau) d\tau = 0 \quad (2.15)$$

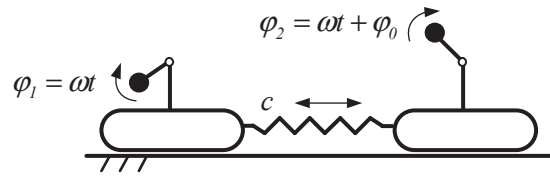
erfüllt ist. Zur Erzeugung einer gerichteten Bewegung ist eine Unsymmetrie notwendig. Die Eigenschaften des Systems in der ersten Halbperiode der Schwingung müssen sich von denen in der zweiten unterscheiden. Die Ortsveränderung wird durch  $X$  beschrieben, mit einem Mittelwert über die Periodendauer  $T$  ungleich null.

Für eine Vielzahl von vibrationsgetriebenen Robotern kann die maximale Geschwindigkeit  $\dot{X}$  im Falle von Resonanz beobachtet werden, siehe Abschnitt 3.2. In diesem Fall liegt die Erregungskreisfrequenz  $\Omega$  der Antriebskraft  $F_A$  nahe der Eigenkreisfrequenz  $\omega$  eines elastischen Bauteils, z. B. eines Wirk- oder Übertragungselements:

$$\Omega = \omega + \varepsilon \Delta. \quad (2.16)$$

$\varepsilon \Delta$  ist die Verstimmung zur Resonanz mit  $\varepsilon \ll 1$ . Wenn die Erregungsfrequenz die Resonanzstelle durchläuft, resultiert eine Vorzeichenänderung von  $\Delta$  und das System ändert seine Bewegungsrichtung.

Dieses Phänomen wurde in [Zim09b] anhand des in Abb. 2.2 dargestellten Lokomotionssystems untersucht. Es besteht aus zwei identischen, mit  $c$  elastisch gekoppelten Segmenten. Die Erregung erfolgt durch die Drehung zweier Unwuchtmassen mit gleicher Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ , jedoch einer Phasenverschiebung  $\varphi_0$ .



**Abb. 2.2:** Durch die Rotation innerer Massen erregtes Lokomotionssystem aus zwei elastisch gekoppelten Segmenten nach [Zim09b]

### 2.2.4 Terrestrische Lokomotion

Werden die antreibenden Kräfte  $F_A$  durch kraftschlüssige Verbindung oder geometrische Zwangsbedingungen mit einer trockenen, festen Umgebung erzeugt, wird von terrestrischer Lokomotion gesprochen. Als feste Umgebungen werden hier gerade Untergründe oder Zylinder mit kreisrunden Querschnitten (Röhren), die das Lokomotionssystem umgeben, bezeichnet. Die Bewegung führt zu keiner wesentlichen Deformation der Umgebung.

Die Kraftwirkung zwischen dem Lokomotionssystem und der Umgebung wird in dieser Arbeit als Coulombsche Reibung modelliert. Nach [Zim09a] beschreibt (2.17) diese für den anisotropen Fall  $\mu_+ \neq \mu_-$  unter Einbeziehung der Haftreibung  $F_H$ . Die Modellvorstellung basiert darauf, dass die Abmessungen der Kontaktflächen vernachlässigt werden können. Die trockene Reibung ist im Fall der Relativbewegung beider Objekte zueinander proportional zur Normalkraft  $N$  über den Gleitreibungskoeffizienten  $\mu$ . Im Falle des Stillstandes muss die Haftreibungskraft  $F_H$  durch die Antriebskraft  $F_A$  überwunden werden. Die Indizes „+“ und „-“ beschreiben dabei die positive bzw. negative Bewegungsrichtung bezüglich eines raumfesten Koordinatensystems.

$$F_R = \begin{cases} \mu_- N, & v < 0 \\ -\mu_+ N, & v > 0 \\ -F_A, & v = 0 \cap -F_{H-} \leq F_A \leq F_{H+} \\ F_{H-}, & v = 0 \cap F_A < -F_{H-} \\ -F_{H+}, & v = 0 \cap F_A > F_{H+} \end{cases} \quad (2.17)$$

Driesen [Dri08] gibt eine Klassifikation von terrestrischen Lokomotionsprinzipien, die sich besonders für vibrationsgetriebene Lokomotion eignet. Sie wird in Tab. 2.1 veranschaulicht. Die Erzeugung der Relativbewegung zwischen System und Umgebung kann in zwei Prinzipien unterteilt werden:

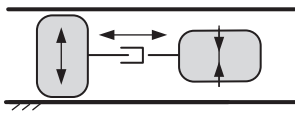
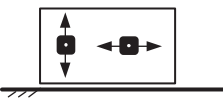
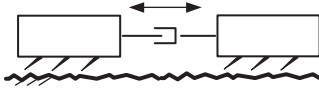
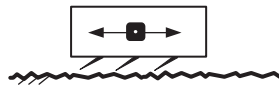
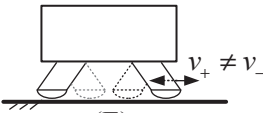
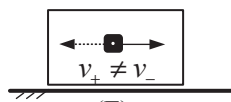
- die Kontaktpunkte des Systems zur Umgebung können relativ zueinander bewegt werden: (A), (C) und (E) oder
- die Massenträgheiten von Körpern, die relativ zum Hauptkörper schwingen und keinen Kontakt zur festen Umgebung besitzen, werden benutzt: (B), (D) und (F).

## 2 Grundlagen

Ist die Masse eines Systems konstant, kann nach (2.13) und (2.17) die gerichtete Bewegung eines periodisch erregten Systems durch:

- nicht symmetrische Reibungskräfte  $F_R$ : (A) bis (D) oder
- nicht symmetrische Antriebskräfte  $F_A$ : (E) und (F), erzeugt werden.

**Tab. 2.1:** Klassifikation von terrestrischen Fortbewegungsprinzipien nach [Dri08] basierend auf trockener Reibung mit den Indizes „+“ und „-“ für die positive und negative Bewegungsrichtung

		Periodischer Antrieb	
		Relativbewegung	Trägheitswirkung
Nicht symmetrische Systemeigenschaften	Kontaktkraft $N_+ \neq N_-$	 (A)	 (B)
	Reibungskoeffizient $\mu_+ \neq \mu_-$	 (C)	 (D)
	Antriebskraft $F_{A+} \neq F_{A-}$	 (E)	 (F)

Folgend werden bekannte Lokomotionsprinzipien nach Tab. 2.1 klassifiziert und beschrieben. In der Robotik sind sie häufig in Kombination miteinander realisiert.

**(A):** Diese Kategorie umfasst Prinzipien, die eine periodische Kontaktkraftänderung an zwei oder mehr Kontaktstellen realisieren und diese synchronisiert, relativ zueinander bewegen. Wird der Kontakt gelöst, nimmt die Kraft den Wert null an.

In der Abbildung ist das sogenannte „Inchworm-Prinzip“ dargestellt. Hierbei wird eine Zwangsbedingung (Haftung) zwischen einem Teil des Systems (Segment) und der Umgebung erzeugt. Relativ zu diesem wird ein zweites Segment nach vorn bewegt. Das vordere Segment stellt Haftung zur Umgebung her, das hintere Segment löst sich und wird nachgezogen. Neben dem „Inchworm-Prinzip“ fällt auch das Laufen oder die Serpensation in diese Kategorie. Beim Laufen steht jeweils ein Segment auf dem Untergrund, während ein anderes relativ zu diesem in Bewegungsrichtung nach vorn bewegt wird, bis dieses aufsetzt und das hintere Segment seine Bewegung beginnt. Serpensation erfolgt durch die Erzeugung einer wellenförmigen Bewegung entlang des Körpers und kann durch Massenverlagerungen oder anisotrope Reibungseigenschaften begünstigt werden. Die Kontaktkraftverteilung entlang der Grenzflächen des Systems wird periodisch variiert.



**(B):** Diese Systeme erzeugen ihre Antriebskraft durch die horizontale, periodische Bewegung einer inneren Masse relativ zum Hauptkörper. Er steht im Kontakt mit der festen Umgebung. Die Lokomotion des Systems wird durch eine periodische, zur Antriebsschwingung synchronisierten Kontaktkraftvariation erzeugt. Dies kann durch eine innere Massenbewegung in vertikaler Richtung erreicht werden. Zusätzliche Module, z. B. Elektromagnete oder Klemmen, können Verwendung finden.

**(C) und (D):** Durch eine angepasste Gestaltung der Kontaktgeometrie können unterschiedliche Reibungskoeffizienten in und entgegen der Bewegungsrichtung realisiert werden:

$$\mu = \begin{cases} \mu_-, & \text{wenn } \dot{x} < 0, \\ \mu_+, & \text{wenn } \dot{x} > 0. \end{cases} \quad (2.18)$$

Spitz zulaufende Borsten oder Schuppen sind Beispiele aus Natur und Technik für die passive Realisierung anisotroper Reibungskoeffizienten. Notwendig ist eine ausreichend große Oberflächenrauigkeit der Umgebung. Da durch  $\mu_+ \neq \mu_-$  die Bewegungsrichtung vorgegeben wird, ist ein einzelner periodischer Antrieb ausreichend.

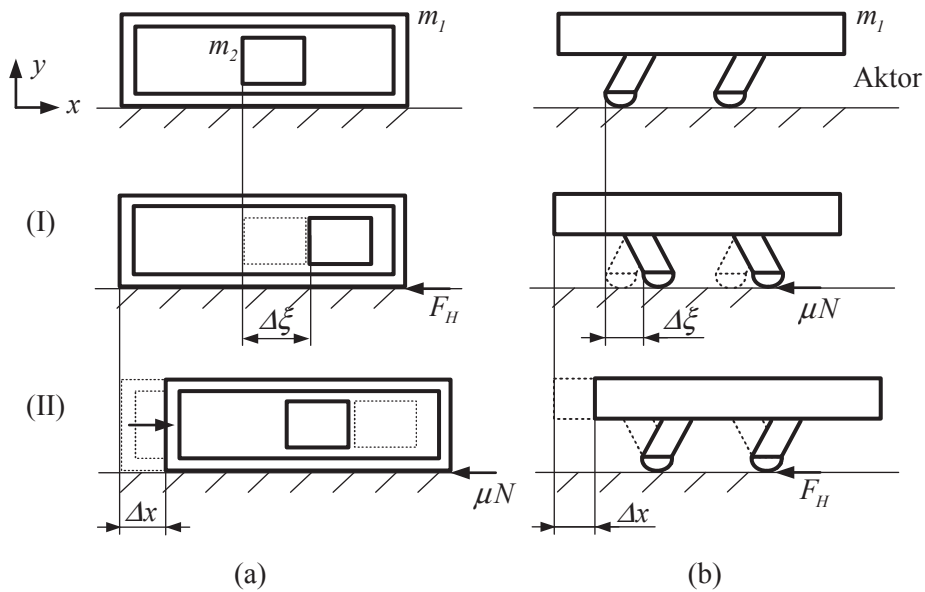
**(C):** Wurmartige Bewegungssysteme (engl. worm-like locomotion systems [Ste12]) orientieren sich an der peristaltischen Lokomotion von Regenwürmern. Sie bestehen aus zwei oder mehr Segmenten, die periodisch relativ zueinander in Bewegungsrichtung verschoben werden.

**(D):** Wird die Antriebskraft durch eine innere Massenbewegung erzeugt und  $\mu_+ \neq \mu_-$  gilt, können Lokomotionssysteme aus nur einem Segment mit Umgebungskontakt bestehen.

**(E) und (F):** Diese Lokomotionsprinzipien basieren auf nicht symmetrischen Antriebskräften, d. h., das System wird über eine Periodendauer der inneren Schwingung in Vor- und Rückrichtung unterschiedlich stark beschleunigt. Dies wird z. B. durch die Geschwindigkeitsunterschiede der Aktorbewegung erreicht. Beispiele sind Stick-Slip-Antrieb und Trägheitsantrieb (engl. inertia drive), welche den Wechsel aus Haft- und Gleitreibung benutzen. Beim Trägheitsantrieb **(F)** wird die Unsymmetrie der Systemeigenschaften durch Beschleunigungsunterschiede innerer Massen erzeugt, was zu unterschiedlichen Periodendauern  $T_+$  und  $T_-$  für die Vor- und Rückbewegung der Masse führt. Abb. 2.3 (a) veranschaulicht die Wirkungsweise des Trägheitsantriebs für ein schematisches Lokomotionssystem der Masse  $m_1$  mit der Antriebsmasse  $m_2$ . Abb. 2.3 (b) stellt vergleichend die Funktionsweise des Stick-Slip-Antriebes gegenüber, wobei hier die Kontaktflächen zur Umgebung durch geeignete Aktoren und unter Wirkung von Gleitreibung  $\mu N$  schnell verlagert werden. Bei der langsameren Rückbewegung wirkt die Haftkraft  $F_H$  und ermöglicht die Verschiebung des Systemschwerpunktes um die Schrittweite  $\Delta x$ . Stick-Slip- und Trägheitsantrieb werden hauptsächlich für miniaturisierte Roboter verwendet.

Eine mögliche Realisierung von Prinzip **(E)** ist die phasenverschobene Ansteuerung der beiden Aktoren des in Abb. 2.3 (b) dargestellten Stick-Slip-Systems.

## 2 Grundlagen



**Abb. 2.3:** Prinzip von (a) Trägheits- und (b) Stick-Slip-Antrieb, siehe auch Tab. 2.1 (E) und (F): (I) langsame Auslenkung, (II) schnelle Rückbewegung

**Sonderfall Rollen:** Rollen kann nicht in die vorgestellte Klassifizierung eingeordnet werden. Aktive Räder erzeugen die Antriebskraft unter Ausnutzung von Haftreibung durch die Wandlung des rotatorischen Antriebs in eine lineare Fortbewegung. Passive Rollen dienen der Minimierung der Widerstandskraft. Kettenantriebe werden in diese Kategorie eingeordnet, da das Kettenprinzip als Rollen auf selbst gelegten Gleisen interpretiert werden kann.

**Fortbewegung in Röhren:** Um eine Lokomotion in festen Röhren zu erzielen, können alle besprochenen Lokomotionsprinzipien verwendet werden. Naheliegender ist es, die spezifischen Eigenschaften von Röhren gezielt zu nutzen. Die umgebende Wandung ermöglicht die Erzeugung einer Kraftübertragung durch Klemmen [Hol05], [Jat14], wie in Tab. 2.1 (A) illustriert. Durch die Führungseigenschaften einer verzweigungsfreien Röhre kann auf eine ebene Richtungssteuerung verzichtet werden.



### 2.2.5 Aquatische Lokomotion in Flüssigkeiten

Als aquatische Lokomotion wird hier nach [IFT12] die Lokomotion eines technischen oder natürlichen Systems im Wasser definiert.

Um Lokomotion in einer Flüssigkeit zu erzeugen ist diese in Bewegung zu versetzen. Unter Einbeziehung von Randbedingungen kann das Geschwindigkeitsfeld des Fluids vollständig durch die Navier-Stokes-Gleichung beschrieben werden. Für ein inkompressibles Medium ( $\text{div} \vec{v} = 0$ ) mit konstanter Dichte  $\rho$  und Viskosität  $\eta$  hat diese vektorielle Gleichung die Form

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla} p + \eta \Delta \vec{v} + \rho \vec{g}, \quad (2.19)$$

wobei  $\vec{v}$  die Geschwindigkeit,  $p$  den Druck und  $\vec{g}$  die Erdbeschleunigung beschreiben. Durch die Einführung einer charakteristischen Länge  $L_c$  und charakteristischen Geschwindigkeit  $v_c$  können die folgenden dimensionslosen Größen definiert werden:

$$\vec{r}^* = \frac{1}{L_c} \vec{r}, \quad \vec{v}^* = \frac{1}{v_c} \vec{v}, \quad t^* = \frac{v_c}{L_c} t, \quad p^* = \frac{1}{\rho v_c^2} p. \quad (2.20)$$

Durch Anpassung der Differentialoperatoren ( $\vec{\nabla}^* = L_c \vec{\nabla}$ ,  $\Delta^* = L_c^2 \Delta$ ) an die dimensionslose Schreibweise und Einführung der kinematischen Viskosität  $\nu = \eta / \rho$  lässt sich für (2.19) schreiben:

$$\frac{d\vec{v}^*}{dt^*} = -\vec{\nabla}^* p^* + \frac{\nu}{L_c v_c} \Delta^* \vec{v}^* + \frac{L_c g}{v_c^2} \frac{\vec{g}}{|\vec{g}|}. \quad (2.21)$$

Unter Anwendung der dimensionslosen Kennzahlen der Fluidmechanik Reynolds-Zahl  $Re$  und Froude-Zahl  $Fr$  ergibt sich

$$\frac{d\vec{v}^*}{dt^*} = -\vec{\nabla}^* p^* + \frac{1}{Re} \Delta^* \vec{v}^* + \frac{1}{Fr} \frac{\vec{g}}{|\vec{g}|}. \quad (2.22)$$

$Fr$  ist ein Maß für das Verhältnis aus Trägheitskräften  $F_T$  und Schwerkraft  $F_G$  des Fluids und wird als

$$Fr = \frac{v_c^2}{g L_c} \sim \frac{F_T}{F_G} \quad (2.23)$$

definiert [Sch89]. Für die Beschreibung von aquatischer Lokomotion kommt  $Re$  besondere Bedeutung zu. Sie dient dazu, die relative Wichtigkeit von Trägheitskräften  $F_T$  und Zähigkeitskräften  $F_V$  bei gegebenen Bedingungen zu quantifizieren.

$$Re = \frac{L_c v_c}{\nu} \sim \frac{F_T}{F_V} \quad (2.24)$$

Bewegt sich ein Lokomotionssystem in einer Flüssigkeit, resultiert die bewegungshemmende Widerstandskraft  $F_W$  aus Trägheit und Zähigkeit des Fluids. Die zur Fortbewegung benötigte Antriebskraft  $F_A$  kann ebenso unter Ausnutzung von Zähigkeit und Trägheit aufgebracht werden. In Bezug zu den charakteristischen Größen des Systems und der Flüssigkeit kann die aquatische Lokomotion in Abhängigkeit der Dimension von  $Re$  beschrieben werden, siehe Abb. 2.4.

## 2 Grundlagen

**$10^3 < \text{Re} < \text{Re}_{\text{krit}}$** : Für große Reynolds-Zahlen kann die Viskosität vernachlässigt werden und (2.19) hat die Form der Euler-Gleichung für inkompressible Fluide:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla}p + \rho\vec{g}. \quad (2.25)$$

Eine häufige aquatische Antriebsform in Natur und Technik ist die Ausnutzung von hydrodynamischen Auftrieb, der bei Umströmung eines Körpers rechtwinklig zur Trägheitskraft wirkt und aus nicht symmetrischem hydrodynamischen Druck resultiert. Die meisten Fische erzeugen solche Antriebskräfte durch undulatorische Verformung des Körpers bzw. Flossenschlag [Tay10]. Die Schiffsschraube ist ein Beispiel aus der Technik. Strahlantriebe dagegen nutzen Trägheitskräfte durch gezielte geradlinige Strömungserzeugung, z. B. Quallen oder Jet-Boote.

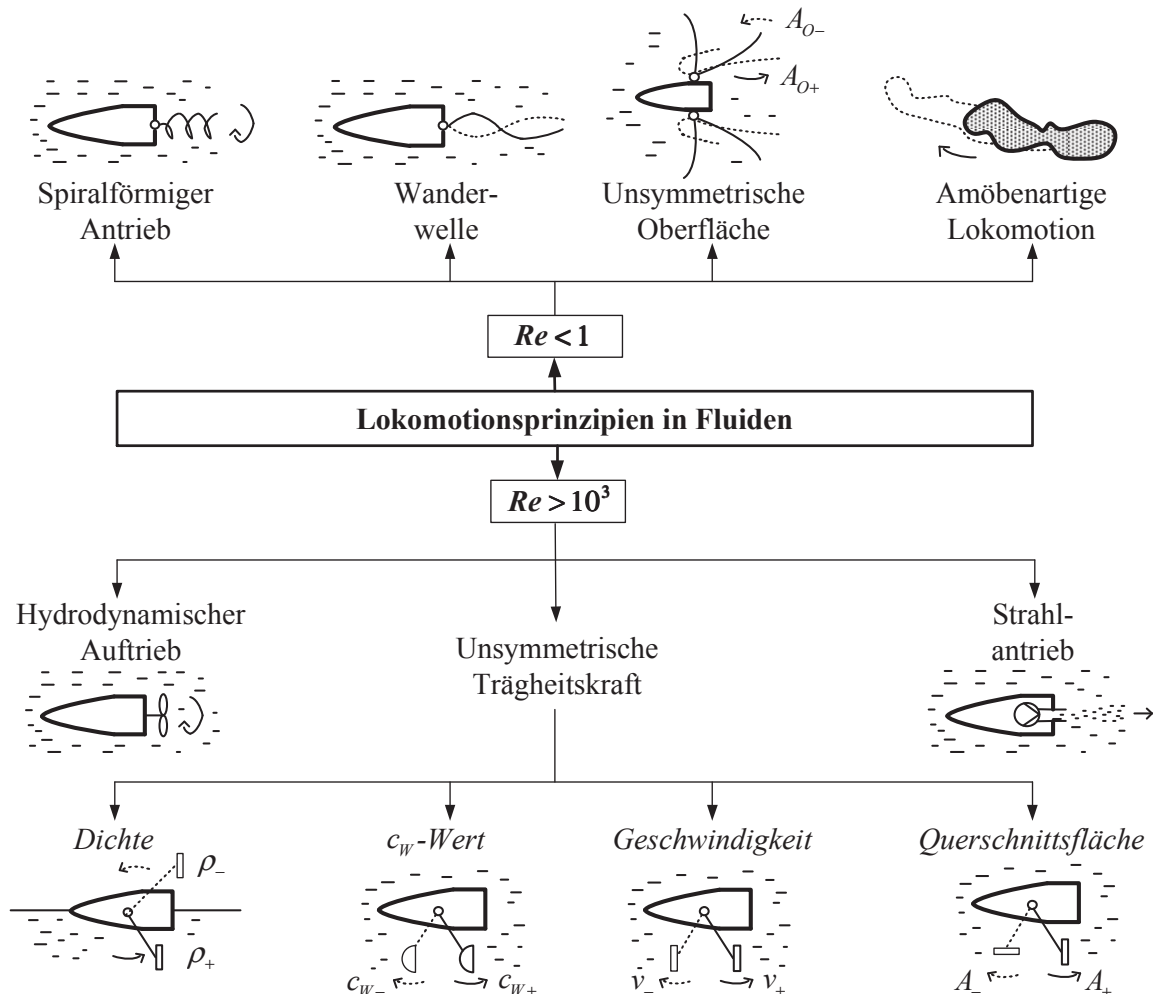
In vibrationsgetriebenen Lokomotionssystemen, welche Bedingung (2.15) erfüllen, kann die Lokomotion durch nicht symmetrische Trägheitskräfte erzeugt werden. Die Unsymmetrie der Systemeigenschaften während einer Periode der inneren Antriebsschwingung kann in Dichte,  $c_W$ -Wert, Querschnittsfläche und Geschwindigkeit liegen. In Abb. 2.4 sind diese Prinzipien schematisch dargestellt.

**$\text{Re} < 1$** : Beim Auftreten von sehr kleinen Reynolds-Zahlen bewegt sich ein System entweder besonders langsam, in sehr viskosen Medien oder ist relativ klein. Der Effekt der Turbulenz existiert, selbst für strömungstechnisch ungünstige Körper, nicht und das Fließverhalten ändert sich nicht wahrnehmbar bei Geschwindigkeitsänderungen. Daraus resultiert, dass eine einfache vibrierende Bewegung keine Lokomotion erzeugen kann. Die zeitabhängigen Anteile von (2.19) können vernachlässigt werden. Eine solche Flüssigkeitsbewegung wird als kriechend bezeichnet und lässt sich mithilfe der Stokes-Näherung (2.26) für  $\text{Re} \ll 1$  ausdrücken.

$$\vec{0} = -\vec{\nabla}p + \eta\Delta\vec{v} + \rho\vec{g} \quad (2.26)$$

Entsprechend lassen sich Antriebsprinzipien für sehr kleine Reynolds-Zahlen eher mit undulatorisch-kriechender als schwimmender Fortbewegung assoziieren. Die Lokomotion muss durch eine gezielte nicht symmetrische Änderung der Körperform erfolgen [Pur77]. In Abb. 2.4 sind Beispiele schematisch dargestellt. Amöben erzeugen ihre Fortbewegung durch die Bewegung innerer Flüssigkeiten und gezieltes Ausstülpen ihrer Oberfläche. Andere Kleinstlebewesen, wie Pantoffeltierchen, beeinflussen die Größe ihrer effektiven Körperoberfläche  $A_O$  durch Ein- und Ausklappen ihrer Flimmerhärchen bei der Vor- und Rückbewegung dieser. Einige Bakterien besitzen die Möglichkeit ihren Geißeln durch molekulare Antriebe eine Helixform zu geben. Eukaryotische Mikroorganismen erzeugen Wanderwellen in ihren Geißeln. Besonders die beiden letzten Formen finden in prototypischen technischen Systemen Verwendung [Nel10].

**$1 < \text{Re} < 10^3$** : Der größte Teil der im Stand der Technik besprochenen Roboter ist durch mittlere Reynolds-Zahlen charakterisiert. In diesem Bereich sind sowohl Zähigkeits- als auch Trägheitseffekte von Bedeutung und alle Terme in (2.19) zu berücksichtigen. Kleine Insekten oder die Fortbewegungsgliedmaßen großer Insekten bewegen sich in dieser Dimension. Zum Beispiel nutzt der Wasserkäfer das Prinzip des Ruderns ( $v_1 \neq v_2$ ), wobei seine Beinchen zusätzlich ein zähigkeitskraftminimierendes Strömungsprofil besitzen.



**Abb. 2.4:** Klassifikation von aquatischen Fortbewegungsprinzipien anhand der Dimension der Reynolds-Zahl  $Re$  („+“, „-“ - Indizes zur Kennzeichnung der Vorwärts- und Rückwärtsbewegung)

## 2.2.6 Aquatische Lokomotion an der Flüssigkeitsoberfläche

### Vertikale Kräfte an der Oberfläche

Für Lokomotionssysteme, die sich an der Grenzfläche von Gasatmosphäre und Flüssigkeit bewegen, ist die Grundvoraussetzung nicht zu sinken. Dies ist abhängig von der Größe, der Dichte  $\rho_S$  und des hydrophoben oder hydrophilen Charakters.

Ob ein Objekt groß oder klein ist, kann mithilfe der Baudoin-Zahl  $Ba$  [Bau55] oder der charakteristischen Länge  $L_c$  im Vergleich zur Kapillarlänge  $l_K = (\sigma/\rho g)^{1/2}$  [Bus06] bewertet werden. Wasser hat bei Raumtemperatur und auf Meeresspiegellhöhe die Kapillarlänge  $l_K \approx 2,7$  mm.

$$Ba = \frac{mg}{\sigma L_K} \quad (2.27)$$

Für große Objekte gilt  $L_c > l_K$  und  $Ba > 1$ . Oberflächenspannungskräfte  $F_\sigma$  können vernachlässigt werden. Damit sie, im statischen Fall, nicht sinken, muss ihre durchschnittliche Dichte  $\rho_S$  kleiner als die des umgebenden Fluids  $\rho$  sein. Im dynamischen Fall kann eine Kombination aus statischem Auftrieb, Fluidträgheitskräften und hydrodynamischen Druck benutzt werden.

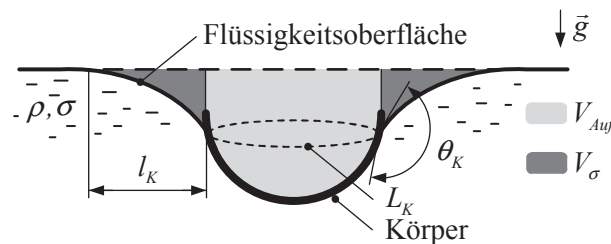
Kleine Systeme, es gilt  $L_c < l_K$  und  $Ba < 1$ , deren Dichte größer als die des Fluids ist, müssen einen nicht benetzenden Charakter besitzen, um nicht in die Flüssigkeitsoberfläche einzudringen und unterzugehen. Statisch müssen die aufgebrachten Kräfte aus Auftrieb  $F_{Auf}$  und Oberflächenspannung  $F_\sigma$  größer sein, als die Schwerkraft des Systems. Nach [Kel98] sind die Kräfte von Auftrieb und Oberflächenspannung proportional der Schwerkraft der verdrängten Wasservolumina innerhalb und außerhalb der Flüssigkeit-Gas-Körper-Kontaktlinie  $L_K$ :

$$\begin{aligned} F_{Auf} &= g\rho V_{Auf} \\ F_\sigma &= g\rho V_\sigma \end{aligned} \quad (2.28)$$

In Abb. 2.5 ist das für einen teilweise eingetauchten, nicht benetzenden, halbkugelförmigen Körper dargestellt. Solche Eigenschaften können durch geeignete Materialkombinationen, wie Polytetrafluorethylen (PTFE) und Wasser, oder die (Mikro-) Strukturierung der Materialoberfläche erzeugt werden. Kennzeichnend hierfür ist der Kontaktwinkel  $\theta_K$ . Der Zusammenhang zwischen Materialrauheit und  $\theta_K$  wird in [Bic02] behandelt.

Mithilfe der dimensionslosen Bond-Zahl  $Bo$  kann das Verhältnis von  $F_{Auf}$  zu  $F_\sigma$  quantifiziert werden:

$$Bo = \frac{\rho g L_c^2}{\sigma} \sim \frac{F_{Auf}}{F_\sigma}. \quad (2.29)$$



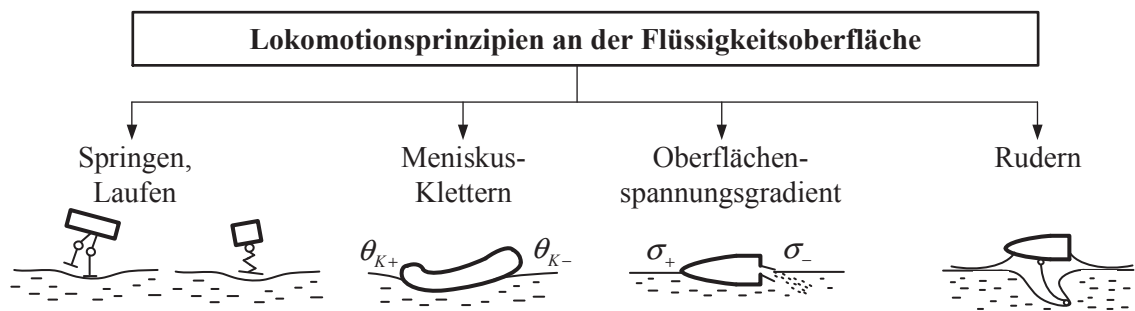
**Abb. 2.5:** Teilweise eingetauchter Körper verdrängt das Flüssigkeitsvolumen  $V_{Auf} + V_\sigma$

### Erzeugung der Lokomotion

Für eine Fortbewegung an der Grenzfläche von Flüssigkeiten gelten die gleichen Betrachtungen wie im vorhergehenden Abschnitt 2.2.5, vergl. Abb. 2.4, wenn das betrachtete Lokomotionssystem hinreichend tief in das Fluid eingetaucht ist.

Weitere Möglichkeiten sind in Abb. 2.6 dargestellt. Bewegungssysteme können sich springend oder laufend an der Fluidoberfläche fortbewegen, wenn ausreichend große Kräfte aus statischem Auftrieb, Flüssigkeitsträgheit, hydrodynamischen Auftrieb und Oberflächenspannung wirken.

Eine zielgerichtete Verformung der Flüssigkeitsoberfläche kann zu Oberflächenspannungskräften mit einer vertikalen Komponente ungleich null führen, indem bewegungsrichtungsabhängig unterschiedliche Kontaktwinkel  $\theta_K$  erzeugt werden. Dies wird als Meniskus-Klettern bezeichnet. Mesovelia-Insekten können den Wert der Oberflächenspannung  $\sigma$  entlang ihres Körpers aktiv beeinflussen und bewegen sich entlang des dadurch entstandenen Gradienten (Maragoni-Antrieb). Wasserläufer-Insekten und zahlreiche an diesen Lebewesen orientierte Roboter, siehe Abschnitt 3.3, stoßen sich rudern an der verformten Wasseroberfläche ab, ohne diese dabei zu durchdringen. Die hydrophoben Eigenschaften ihrer Antriebsgliedmaßen sind hierbei von besonderer Bedeutung.



**Abb. 2.6:** Prinzipien der aquatischen Lokomotion an der Flüssigkeitsoberfläche als Ergänzung zu Abb. 2.4 („+“, „-“ - Indizes für die positive und negative Bewegungsrichtung)

## 2 Grundlagen

### Wellenwirkung

Ein weiterer Aspekt bei der Bewegung an der Flüssigkeitsoberfläche, aber auch bei der Bewegung im Fluid, sind Wellen. Das Wellenfeld in einer Flüssigkeit ist durch Schwere- und Kapillarwellen gekennzeichnet. Schwerewellen entstehen durch die Trägheit eines Fluids und seiner Eigenschaft einen stabilen Gleichgewichtszustand, unter dem Einfluss der Schwerkraft, anzustreben. Ihre Wellenlängen  $\lambda$  liegen bei 1 m bis 100 m [Lig93] und sind damit für die vorliegende Arbeit nicht von Bedeutung. Kapillarwellen sind Wanderwellen entlang der Grenzfläche einer Flüssigkeit. Ihre Dynamik wird durch die Oberflächenspannung  $\sigma$  bestimmt. Die Kapillarwellenlänge ist typischerweise kleiner als 4 mm [Lig93]. Eine Schwere-Kapillar-Welle an der Flüssigkeitsoberfläche wird durch Schwer-, Trägheits- und Oberflächenspannungskraft beeinflusst. Für die vorliegende Arbeit werden Wellen vorrangig als dissipative Phänomene betrachtet. Zum Einen geht Antriebsenergie durch die Erzeugung von Wellen verloren, zum Anderen bilden sie einen Widerstand für die stetige Bewegung eines Lokomotionssystems, besonders an der Oberfläche eines Fluids. Für die Gestaltung von Schiffen ist der Wellenwiderstand durch Schwerewellen von herausragender Bedeutung. Für miniaturisierte Systeme können (Schwere-)Kapillar-Wellen ein Hindernis darstellen, wenn sie sich kontinuierlich an der Wasseroberfläche bewegen.

Für die später vorgestellten Roboter kann der Wellenwiderstand im Vergleich zum Form- und Viskositätswiderstand vernachlässigt werden, da die Eintauchtiefe deutlich größer als die Amplitude der Wellen ist.

### 2.3 Steuerbarkeit

In der Regelungstechnik ist „ein System steuerbar, wenn es in endlicher Zeit durch Wahl des Steuervektors  $u(t)$  aus einem beliebigen Anfangszustand  $x_0$  in den Endzustand  $x = 0$  gebracht werden kann“ [Her05]. In dieser Arbeit wird unter der Steuerbarkeit eines Lokomotionssystems verstanden, dass die Bewegung durch geeignete Stellsignale maßgeblich und gerichtet beeinflusst werden kann.

### 2.4 Miniaturisierung

Miniaturisierung ist die ähnliche Verkleinerung eines Objektes bei gleichbleibenden geometrischen Proportionen. Zur Beschreibung der damit einhergehenden Veränderung (Skalierung) der physikalischen Effekte im System wird der Skalierungsfaktor  $s$  eingeführt. Gegeben sei ein Objekt mit der charakteristischen Länge  $L_c$ . Wird es um den Faktor  $0 < s < 1$  verkleinert, skalieren die Fläche mit  $s^2$  und das Volumen mit  $s^3$ . Gleiches gilt für längen-, flächen- und volumenabhängige physikalische Effekte. Der relative Einfluss flächenproportionaler Effekte, wie Adhäsion, Wärmeübertragung an Grenzflächen oder Oberflächenspannung, wächst bei der Miniaturisierung gegenüber volumenbezogener Größen, wie Masse, normalkraftproportionaler Reibung oder Wärmekapazität. Die Skalierung physikalischer Effekte wird in [Ish96], [Wau01] und [Tri02] besprochen.

## 2.5 Antriebe für vibrationsgetriebene Lokomotion

Für eine Realisierung der besprochenen Lokomotionsprinzipien in vibrationsgetriebenen Robotern werden Antriebe benötigt. In diesem Unterkapitel wird ein qualitativer Vergleich erarbeitet, der in Tab. 2.2 dargestellt ist. Er dient der Auswahl geeigneter Antriebssysteme im Designprozess mobiler Roboter. Entsprechend der Randbedingungen der Arbeit, siehe Tab. 1.1, wird hier eine qualitative Bewertung der Antriebe nach ihrer Eignung für

- hohe Mobilität (Wirkungsgrad, Masse, Bauraum),
- vibrationsgetriebene Lokomotion (Kraft, Auslenkung, Frequenz),
- Miniaturisierung,
- terrestrische Lokomotion und
- aquatische Lokomotion in Flüssigkeiten und an ihrer Oberfläche verfolgt.

Vergleichende Übersichten von Antriebselementen anhand anderer Kriterien werden in [Zup02], [Pon05], [Ise08], [Jan13] bzw. von miniaturisierten Antriebselementen in [Dar92], [Ish96], [TA98], [Ebe02], [Kar08], [Fir10], [Chu12] gegeben.

Das Antriebselement eines mobilen Roboters bildet die Verbindung aus dem informationsverarbeitenden Teil, der Energieversorgung und der mechanischen Struktur zur Lokomotionserzeugung. Es besteht aus Energiesteller und Energiewandler. Der Energiesteller verstärkt die Steuerungssignale der Informationsverarbeitung durch die Hilfsenergie aus der Versorgung und überträgt sie auf den Energiewandler. Hier werden nur elektro-mechanische Energiewandler betrachtet, die von einem als optimal angenommenen elektrischen Energiesteller versorgt werden. Der Begriff Aktor wird hierbei als Synonym für den Energiewandler verwendet.

Nur Antriebe werden berücksichtigt, die sich bereits in miniaturisierten mobilen Robotern etabliert haben, vergl. Kapitel 3, und in einer Größe von  $< 1 \text{ cm}^3$  realisiert werden können. Ausgewählt werden Gleichstrommagnete, drehende Gleichstrommotoren, sowie piezoelektrische Aktoren (Werkstoff: PZT) in Stapelbauweise und als Biegeaktor. Als Beispiel für Mikroantriebe [Rie97] werden elektrostatische Plattenaktoren betrachtet. Eine Möglichkeit die „Intelligenz des Systems“ in seine Mechanik zu integrieren, ist der Einsatz „intelligenter Werkstoffe“ [Bor08], [Jan13]. Neben PZT werden, aufgrund ihres Potentials für aquatische Lokomotion, Drähte aus der thermischen Formgedächtnislegierung NiTi und ionische Metall-Polymer-Verbunde (IMPV) als Biegeaktor betrachtet.

Die Zahlenwerte von wichtigen Kenngrößen der Antriebe, die für die Bewertung herangezogen werden, sind im Anhang A.1 in Tab. A.1 mit Quellenangabe gelistet. Es wird hier, anhand des Aktorvolumens, mikroskopisch als  $V < 10 \text{ mm}^3$  und makroskopisch als  $V \approx 50 - 1000 \text{ mm}^3$  definiert.



### Gleichstrommagnete und Gleichstrommotoren

Beide Systeme bestehen aus mehreren metallischen Teilen und Gehäuse, woraus sich eine hohe Masse und ein großes Volumen begründen. Die Verluste bei der elektro-magneto-mechanischen Energiewandlung begrenzen den Wirkungsgrad.

Um einen Schwingmagneten zu realisieren, wird eine zweite Spule oder mechanische Feder zum Aufbringen der Gegenkraft benötigt. Die Ausnutzung von Resonanz, siehe (2.7) mit  $m$  als Ankermasse und  $c$  als Steifigkeit der Rückstellfeder, ermöglicht große Auslenkungen und moderate Kräfte in einem schmalen Frequenzband. Die Joulesche Erwärmung der Spulen begrenzt die Dynamik eines Magneten. Die Vibrationserzeugung mit Gleichstrommotoren erfolgt im einfachsten Fall durch Anbringung einer Unwuchtmasse an der Motorwelle. Die Rotation erzeugt die stets in radialer Richtung wirkende Fliehkraft  $F = mR\omega^2$  mit Masse  $m$ , Radius  $R$  und Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ .

Bei der Miniaturisierung von Elektromagneten ist die Herstellung kleiner Spulen eine besondere Herausforderung. In der Mikrosystemtechnik werden sie meist einlagig und mit nur wenigen Windungen realisiert. Die Magnetkraft skaliert im makroskopischen Bereich quadratisch. Bei starker Miniaturisierung muss von einer Kraftskalierung von  $s^4$  ausgegangen werden, da die maximale Stromdichte im Draht der Erregerspule als begrenzender Faktor berücksichtigt werden muss. Miniaturisierte Schwingmagnete werden mit einer Wechselspannung im einstelligen Voltbereich betrieben. Für Kleinstmotoren mit einem Bauraum von  $1 - 2 \text{ cm}^3$  werden Drehzahlen über 20000 U/min [Gro13] erreicht. In diesen Dimensionen werden häufig bürstenlose Antriebe mit elektronisch erzeugtem Drehfeld verwendet. Eine weitere Miniaturisierung wird sowohl durch die Skalierung von Reibungs- und Magnetkraft erschwert, als auch durch technologische Herausforderungen in der Fertigung.

Für terrestrische Systeme moderater Volumina besitzen Gleichstrommotoren und Gleichstrommagnete ein hohes Potential. Ihre großen Stellkräfte und einfache Ansteuerung gleichen Nachteile in Größe, Gewicht und Wirkungsgrad aus. Der Wirkungsgrad steigt mit wachsender Baugröße. Das hohe Gewicht und die relativ zueinander bewegten Teile schränken die Eignung elektromagnetischer Antriebsprinzipien für die aquatische Lokomotion ein.

### Elektrostatische Aktoren

Elektrostatische Aktoren basieren auf der Coulombschen Anziehungskraft zwischen geladenen Körpern. In einer einfachen Bauweise bestehen sie aus zwei parallelen Platten, an die eine elektrische Spannung angelegt wird. Die Rückstellung erfolgt durch eine mechanische Feder. Die normal zu den Platten wirkende Kraft berechnet sich aus der gespeicherten elektrischen Energie und ist somit proportional zur Kapazität. Zur Erzeugung relevanter Kräfte müssen sehr große elektrische Spannungen angelegt und der Plattenabstand minimiert werden. Hieraus wird ersichtlich, dass dieses Antriebsprinzip für makroskopische (aquatische) Systeme ungeeignet ist.

Durch Ätzverfahren können mikrotechnisch Aktoren mit Plattenabständen weniger Mikrometer realisiert werden [Rie97], [Ebe02]. Dadurch wird eine hohe Kapazität erreicht. Geringe Spannungen, im Bereich von 10 V, führen zu hohen elektrischen Feldstärken. Die absoluten Hübe und bewegbaren Massen sind klein, was nachteilig für die Erzeugung vibrationsgetriebener Lokomotion ist. Von Vorteil ist die Möglichkeit der Erzeugung hoch-



frequenter Schwingungen. In mikrotechnischer Ausführung besitzen sie einen sehr hohen Wirkungsgrad. Für aquatische Systeme sind Plattenaktoren ohne spezielle Kapselung des Aktors ungeeignet. Eine Ursache ist die hohe elektrische Feldstärke.

### **Piezoelektrische Aktoren**

Piezoelektrische Biege- und Stapelaktoren zeichnen sich durch ein geringes Gewicht und einen hohen Wirkungsgrad aus. Der Bauraum ist vergleichsweise gering.

Stapelaktoren können große Kräfte bei geringen Auslenkungen erzeugen. In Biegeaktoren sind die Kräfte kleiner, aber die Auslenkungen größer. Der Hub ist proportional zur Amplitude der angelegten Wechselspannung, wird aber durch die Durchschlagsfestigkeit auf wenig Mikrometer begrenzt. Beide Bauweisen ermöglichen sehr hohe Vibrationsfrequenzen. Aktoren aus sogenannten „Hart“-PZT-Keramiken haben eine hohe Verstärkung im Resonanzfall, was hohe Schwingungsamplituden im stationären Betrieb ermöglicht. „Weich“-PZT-Keramiken können auch in nicht resonanten Bereichen effektiv angewendet werden, da sie einen hohen elektro-mechanischen Wirkungsgrad für ein breites Frequenzspektrum besitzen. Die Begriffe „hart“ und „weich“ beziehen sich auf das Polarisations- und Depolarisationsverhalten. Die Parameter für den Dauerbetrieb werden durch das thermische Verhalten begrenzt.

Piezoelektrische Biegeaktoren eignen sich für den Einsatz in Mikrorobotern. Durch die Verwendung von Dünnschicht- und Ätztechniken können miniaturisierte Biegeaktoren erzeugt werden. Wegen der Gefahr des elektrischen Durchschlags sind die Aktoren empfindlich gegenüber feuchten Umgebungsbedingungen. Die großen Feldstärken begrenzen die Anwendbarkeit für aquatische Lokomotion im Fluid. Das geringe Gewicht von Piezoaktoren machen sie für Roboter, die sich auf Flüssigkeiten bewegen interessant. Eine Bauform makroskopischer piezoelektrischer Biegeaktoren wird in dieser Arbeit ausführlich betrachtet, siehe Abschnitt 5.2.

### **Formgedächtnislegierungen (FGL)**

Der Aktor selbst besteht aus einem Draht des aktiven Materials - der Nickel-Titan-Legierung (NiTi). Bauraum und Masse sind sehr gering. Die Erwärmung der Legierung durch Wärmeübertragung ist für die betrachteten Roboter ungeeignet, da Heizelemente als zusätzliche Komponenten integriert werden müssten. Geeignet ist die direkte Joulesche Erwärmung. Durch gezielte Stromimpulse kann eine sprunghafte Formänderung erreicht werden. Aus dem notwendigen Wärmetransport zur Abkühlung und Rückstellung ergeben sich der geringe Wirkungsgrad und die niedrige maximale Antriebsfrequenz makroskopischer Realisierungen.

FGL finden in der Mikrosystemtechnik Verwendung. Durch Sputtern können dünne Schichten erzeugt werden. Tendenziell wird die Anwendung in miniaturisierten Systemen interessanter, da der Wärmetransport als Oberflächeneffekt im Vergleich zur volumenabhängigen Wärmekapazität weniger stark skaliert, was eine schnellere Rückstellbewegung (Frequenz) ermöglicht.

Höhere Frequenzen sind auch möglich, wenn FGL-Aktoren für die aquatische Lokomotion in Fluiden eingesetzt werden, da das Fluid normalerweise kälter als der erhitzte Draht ist und höhere Wärmeübertragungs- und Wärmeleitkoeffizienten als Luft besitzt.

## 2 Grundlagen

### Ionische Metall-Polymer-Verbunde (IPMV)

Ionische Metall-Polymer-Verbunde setzen sich aus zwei Elektroden, z. B. Gold oder Platin, und einer Schicht eines elektroaktiven Polymers, wie z. B. sulfoniertes Tetrafluorethylen, zusammen. Ihre Dicke liegt gewöhnlich im Bereich weniger Zehntelmillimeter. Das Anlegen einer Wechselfspannung von bis zu 100 Hz führt zu einer periodischen Bewegung der in der Polymerschicht enthaltenen Wasser- und Natriumionen. Aus der wechselnden Volumenverteilung resultiert eine periodische Biegeverformung.

Bei der Verwendung in einer Luftatmosphäre muss der Aktor durch eine wasserundurchlässige Kapselung vor dem Austrocknen geschützt werden. Interessant sind IPMV als Antriebselemente für die aquatische Lokomotion im Fluid, da auf eine Kapselung verzichtet werden kann. Sie werden in mobilen Robotern angewandt [Guo06], [Chu12]. Die geringen Steuerspannungen sind vorteilhaft. Für die Lokomotion an der Grenzfläche von Fluiden ist ihr geringes Gewicht von Vorteil.

**Tab. 2.2:** Qualitativer Vergleich von Aktoren in ihrer Eignung für vibrationsgetriebene mobile Roboter in verschiedenen Umgebungsbedingungen

Aktor	Mobilität			Umgebung				Vibrationserzeugung		
	Wirkungsgrad	Masse	Bauraum	Mikro	Makro	In Flüssigkeit	Auf Flüssigkeit	Kraft	Auslenkung	Frequenz
<b>Klassische elektrische Aktoren</b>										
Gleichstrommagnete	►	○	○	►	●	○	○	►	●	►
Gleichstrommotoren	►	○	○	○	●	○	○	►	●	►
Elektrostatische Plattenaktoren	●	●	●	●	○	○	○	○	○	●
<b>Intelligente Werkstoffe</b>										
Piezoelektrische Stapelaktoren (PZT)	●	●	►	○	●	○	►	●	○	●
Piezoelektrische Biegeaktoren (PZT)	●	●	●	●	►	○	►	►	►	●
Drähte aus Formgedächtnislegierung (NiTi)	○	●	●	●	►	►	►	●	►	○
Ionische Metall-Polymer-Verbunde	○	●	►	○	○	●	►	►	●	►

● - gut    ► - mittel    ○ - schwach

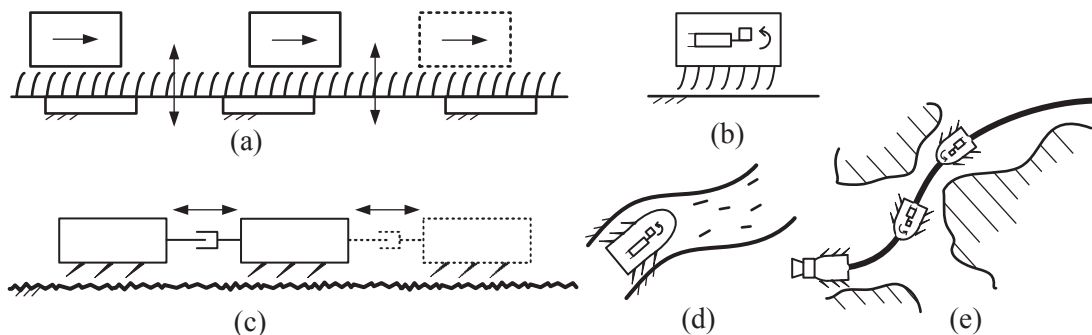
## 3 Stand der Technik

Mobile Roboter sind ein aktuelles Forschungsfeld. Dem Gegenstand der Arbeit entsprechend, werden vibrationsgetriebene mobile Roboter für terrestrische und aquatische Lokomotion besprochen. Es werden nur aquatische Systeme mit Potential für eine terrestrische Lokomotion (amphibische Roboter) betrachtet. Weitere Kriterien sind die in Tab. 1.1 festgelegten Bedingungen.

### 3.1 Roboter mit Borsten für terrestrische Lokomotion

Wie in Abschnitt 2.2.4 dargestellt, sind anisotrope Reibungseigenschaften eine einfache Methode, um Lokomotion durch innere Vibration zu erzeugen. In Natur und Technik sind sie häufig durch die geometrische Gestaltung der Kontaktflächen zweier relativ zueinander bewegter Körper realisiert [Sch01], [Kul09], [Fil13]. Beispiele sind Schuppen, Borsten oder geneigte Härchen, die mit rauen Oberflächen einen Formschluss erzeugen. Wirkelemente, die anisotrope Reibungseigenschaften realisieren, werden in dieser Arbeit als „Borsten“ (engl. bristles) bezeichnet. Sie befinden sich an der Grenzfläche des terrestrischen Lokomotionssystems und sind entgegen seiner Bewegungsrichtung geneigt. Die hier vorgestellten Roboter können nach Tab. 2.1 in die Kategorien (C) und (D) eingeordnet werden.

Borsten werden in Ultraschallmotoren [Sas80], [Miz98], vibrationsbasierten Förderanlagen [Oka88], Endoskopkameras in Medizin [Kas06], [Men07], [Dog10] und Rettungstechnik [Isa06], [Ish11] und mobilen Robotern benutzt. Beispiele sind in Abb. 3.1 schematisch dargestellt.



**Abb. 3.1:** Vibrationsgetriebene Bewegungssysteme mit Borsten: (a) - Stückgutförderer; (b) - „Bristle bot“; (c) - Wurmartiges Lokomotionssystem; (d) - Röhreninspektionsroboter; (e) - Inspektionskamera für Rettungskräfte

### 3 Stand der Technik

Häufig werden Borsten als metallische Drähte oder Bleche ausgeführt [Fuk91], [Aos93], [Sun01], [Gmi02], [Wan08], [Par08], [Gra10] oder aus Kunststoff gefertigt [Hat07], [Osk07], [Gra10], [Ish11], [Inn13], [Gio13]. Weise [Wei02] verwendet Bündel aus Glasfasern. Sie sind in Abb. 3.2 (c) dargestellt. Eine weitere Möglichkeit zur Realisierung der Bedingung  $\mu_+ \neq \mu_-$  ist der Wechsel der im Umgebungskontakt befindlichen Reibflächen, während der Vor- und Rückbewegung, wie in [Dov05], siehe Abb. 3.2 (d), und [Uen14] beschrieben. Gradetsky et al. diskutieren in [Gra10] ein Konzept, bei dem die Endfläche einer makroskopischen Borste mit zahlreichen miniaturisierten Borsten besetzt ist, um eine starke adhäsive Wirkung in Rückwärtsrichtung zu erreichen. In [Par08] wird ein System für Röhren präsentiert, das während einer Periode der inneren Schwingung seine Borstenlänge ändert und sie dadurch in einer Halbperiode stärker als in der anderen an die Wandung drückt. Die Bedingung  $N_+ \neq N_-$  wird realisiert, vergl. Tab. 2.1.

#### 3.1.1 Regenwurmartige Roboter

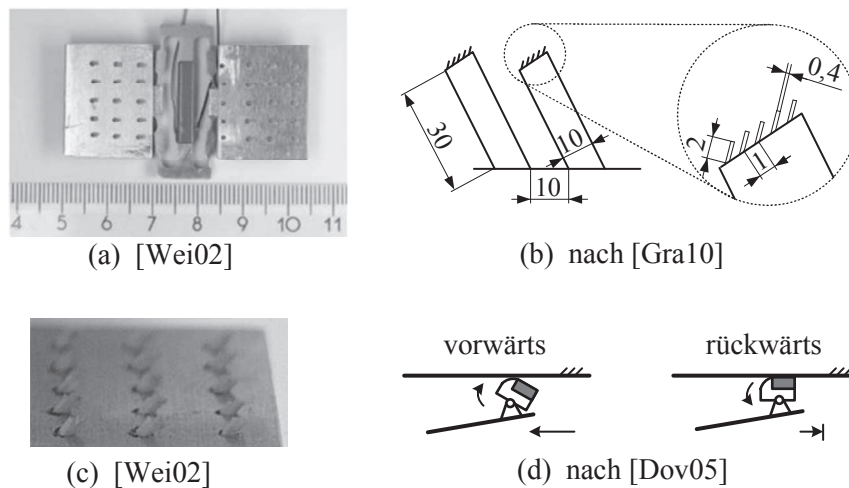
Besonders die borstenunterstützte peristaltische Fortbewegung der Regenwürmer ist Inspiration für Forscher im Umfeld der terrestrischen Lokomotion [Zim09a], [Ste12]. Wurmartige Lokomotionssysteme bestehen aus mindestens zwei borstenbesetzten Segmenten. Ihr Abstand wird durch lineare Aktoren periodisch in Bewegungsrichtung verändert, wie in Abb. 3.1 (c) dargestellt.

Als Beispiel wird hier der Roboter nach [Wei02], siehe Abb. 3.2 (a), beschrieben. Er besteht aus zwei borstenbesetzten Segmenten, die durch einen piezoelektrischen Stapelaktor in Verbindung mit einem Festkörpergetriebe zur Amplitudenvergrößerung relativ zueinander bewegt werden. Messungen der Gleitreibungskoeffizienten in Vorwärtsrichtung  $\mu_+$  und Rückwärtsrichtung  $\mu_-$  zeigen, dass die Größe der Anisotropie  $\mu_+ \neq \mu_-$  stark abhängig von der Rauigkeit des Untergrundmaterials ist. Auf einer Glasfläche sind die Unterschiede gering, aber hinreichend, um eine Geschwindigkeit von 40 mm/s, bei einer Antriebsfrequenz von 230 Hz, zu erzielen. Auf Holzuntergrund ist die Richtungsabhängigkeit sehr stark ausgeprägt und ermöglicht es dem Roboter, Steigungen von bis zu  $35^\circ$  zu erklimmen.

Übersichten zu weiteren prototypischen Lösungen, für flache Untergründe oder Röhren, werden in [Gra10], [Sch11] und [Dal13] gegeben. Regenwurmartige Roboter sind unidirektionale Lokomotionssysteme. Durch aktive Anpassung der Borsten kann ein bidirektionaler Bewegungsbereich erreicht werden. Beispiele sind die Umkehr der Neigung der Borsten oder Wechsel der im Kontakt befindlichen Borstenstruktur. Schulke, Hartmann und Behn geben eine systematische Übersicht der Möglichkeiten zur Realisierung solcher Anpassungen in [Sch11]. In [Mat93] und [Ish95] werden Roboter mit einem vergleichbaren Bewegungsprinzip beschrieben, die einen zweidimensionalen Bewegungsbereich besitzen. Dies wird durch die Anordnung zweier borstenbesetzter Segmente nebeneinander erreicht, die getrennt voneinander angesteuert werden können.

Analytische Beschreibungen regenwurmartiger Lokomotionssysteme werden von Zimmermann et al. [Zim09a], Behn und Steigenberger [Ste12], Bolotnik et al. [Bol13], Chernousko [Che14], sowie Fang et al. [Fan14] gegeben. Zur Modellierung der richtungsabhängigen Eigenschaften der Borsten auf trockenem festen Untergrund wird meist Coulombsche Reibung nach (2.17) mit anisotropen Reibungskoeffizienten und konstanter Normalkraft verwendet. Eine Verformung der Borsten wird nicht betrachtet.

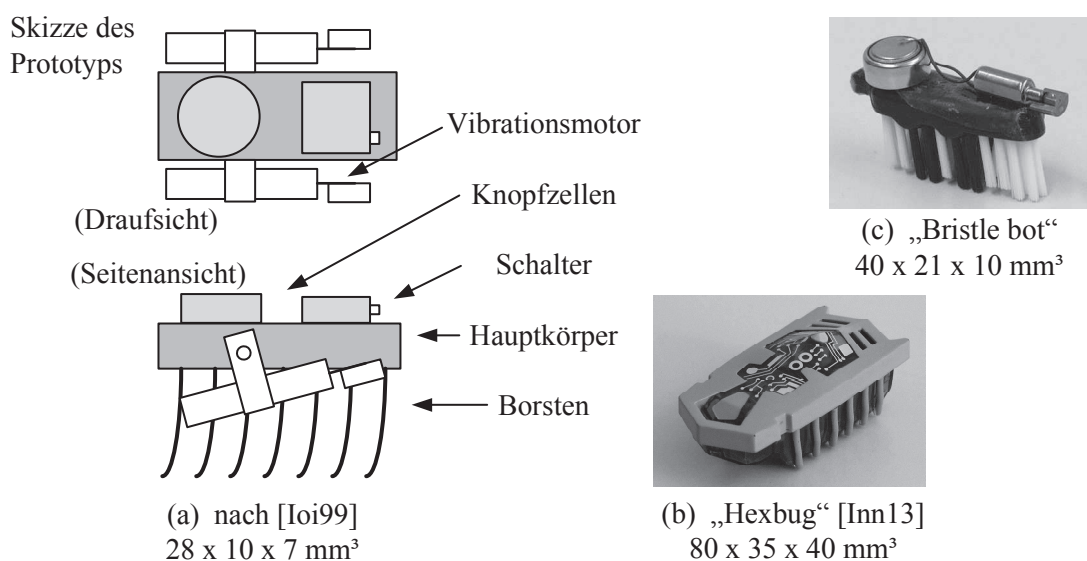
### 3.1 Roboter mit Borsten für terrestrische Lokomotion



**Abb. 3.2:** Beispiel eines regenwurmartigen Roboters (a) und verschiedene Realisierungen von anisotropen Reibungskoeffizienten: (b) - Mikromechanische Borstenstrukturen (Maße in  $\mu\text{m}$ ); (c) - Glasfaserbündel; (d) - „Smart bristles“ mit passiver Änderung der Reibpaarung

#### 3.1.2 „Bristle bots“

„Bristle bots“ sind vibrationsgetriebene Lokomotionssysteme. Sie bestehen aus einem borsenbesetzten Hauptkörper, einer Energiequelle und einem Vibrationsantrieb, siehe Abb. 3.1 (b). Die Erregung des Antriebs führt zu einer periodischen Biegung der Borsten, wodurch aus der inneren Vibration die Lokomotion erzeugt wird. Die Funktionsweise solcher Systeme wird in Kapitel 4 analysiert. Es werden maximale Geschwindigkeiten von  $200 \text{ mm/s}^2$  [Ioi99] bis  $300 \text{ mm/s}^2$  [Gio13] erreicht.



**Abb. 3.3:** Realisierungen von „Bristle bots“ mit Abmessungen

### 3 Stand der Technik

Aufgrund ihres einfachen Aufbaus wurden „Bristle bots“ in den letzten Jahren als mobile Roboter aus dem „low-cost“-Bereich, sowohl als Spielzeug [Mur09], [Inn13], als auch als Objekt der wissenschaftlichen Forschung [Bob12], [Gio13], populär. Beispielhafte Konstruktionen sind in Abb. 3.3 dargestellt. Bauanleitungen aus dem Internet verwenden Zahnbürsten, Knopfzellen, doppelseitiges Klebeband und gebrauchte Vibrationsmotoren aus Mobiltelefonen als Bauteile [Osk07]. Ein vergleichbares System wurde, mit dem Anspruch als autonomer Roboter eingesetzt zu werden, in [Mey06] patentiert. In kommerziellen und wissenschaftlichen Anwendungen werden definierte Eigenschaften der Roboter benötigt [Gio13], [Mim14].

Der erste dem Autor bekannte Roboter dieser Bauart wurde von Ioi im Jahr 1999 veröffentlicht [Ioi99], siehe Abb. 3.3 (a). Das System besteht aus einem Borstenkörper, auf dem Knopfzellen zur Energieversorgung und zwei bürstenlose Gleichstrommotoren mit Unwuchtmassen befestigt sind. Zwei Motoren, deren Drehzahl und Phasenverschiebung zueinander einstellbar sind, ermöglichen eine in der Ebene steuerbare Lokomotion.

In den Systemen (b) und (c) in Abb. 3.3 wird jeweils nur ein Gleichstrommotor verwendet. Seine Fliehkraft wirkt orthogonal zur Vorwärtsrichtung des Roboters, sodass geringste Störungen, wie Unebenheiten im Untergrund, zu einer Änderung der Bewegungsrichtung führen. Die Bewegung wirkt chaotisch. Deshalb werden in [Bob12] „Bristle bots“ als Modell für Menschen in Gefahrensituationen erwogen. Ihre Bewegung soll durch die Konstruktion der Umgebung gesteuert werden. Ziel sind Richtlinien für die Gestaltung von Evakuierungswegen. In [Gio13] werden „Bristle bots“ genutzt, um Aussagen zum Entstehen und Auflösen von Schwärmen zu machen.

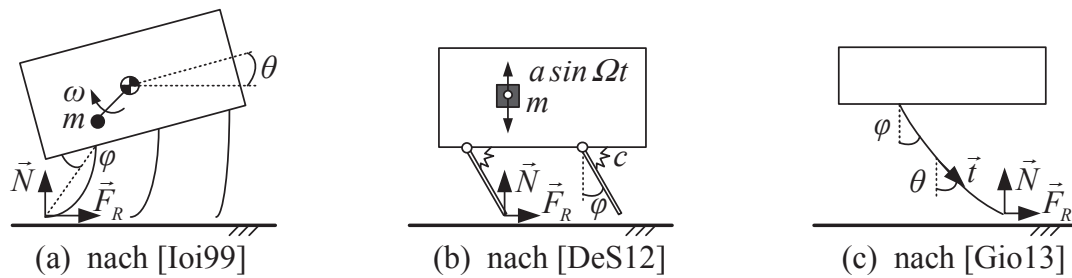
Analytische Beschreibungen von „Bristle bots“ können in [Ioi99], [DeS12] und [Gio13] gefunden werden. Die zweidimensionalen Modelle sind in Abb. 3.4 dargestellt. Es werden masselose Borsten mit linear-elastischen Eigenschaften modelliert.

Das Modell in [Ioi99] gilt für dauerhaften Kontakt zum Untergrund unter Wirkung von Coulombscher Gleitreibung mit  $\mu_+ = 0$  und  $\mu_- = \mu$ . Das System besitzt den Freiheitsgrad drei. Die innere Erregung erfolgt durch die Fliehkraft einer rotierenden Unwuchtmasse. Die Wirkung der Borsten wird durch lineare Feder-Dämpfer-Elemente erfasst. Ziel ist die Berechnung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Neigung der Borsten und Motoren.

DeSimone und Tatone [DeS12] entwickelten, parallel zur vorliegenden Arbeit, ein Modell für das Studium der Bewegung von Bakterien und Zellen mit dem Freiheitsgrad drei. Die Borsten werden als masselose starre Körper beschrieben, die durch diskrete Drehfedern mit dem Hauptkörper verbunden sind. Ein in vertikaler Richtung vibrierender Massenpunkt erzeugt die innere Erregung. Das Modell ermöglicht den Kontaktverlust zum Untergrund. Folgende Reibungsmodelle wurden untersucht:  $F_R = -kv$  und  $F_R = -\mu vN$ , mit  $k$  und  $\mu$  als Konstanten, der Normalkraft  $N$  und der Relativgeschwindigkeit  $v$  zwischen den Borstendpunkten und dem Untergrund. Simulationen zeigten die begrenzte Anwendbarkeit des viskosen Reibungsmodells und die Möglichkeit einer springenden Rückwärtsbewegung.

In [Gio13] wird eine einzelne, idealisierte Borste als Euler-Bernoulli-Balken betrachtet. Während der Biegung wirkt Haftreibung. Das System besitzt dauerhaften Kontakt zum Untergrund. Das Rückwärtsgleiten der Borste wird durch eine Zwangskraft behindert, die Vorwärtsbewegung durch Gleitreibung gebremst. Numerisch wird die Schrittweite nach einer Umdrehung der Unwuchtmasse berechnet. Experimentelle Daten stützen die numerisch gewonnen Aussagen in [Ioi99] und [Gio13].





**Abb. 3.4:** Modellbildung von „Bristle bots“: (a) - Robotermodell mit elastischen Borsten, (b) - Starrkörpermodell, (c) - Elastisches Modell einer einzelnen Borste

### 3.1.3 Anwendungen in der Inspektion und Endoskopie

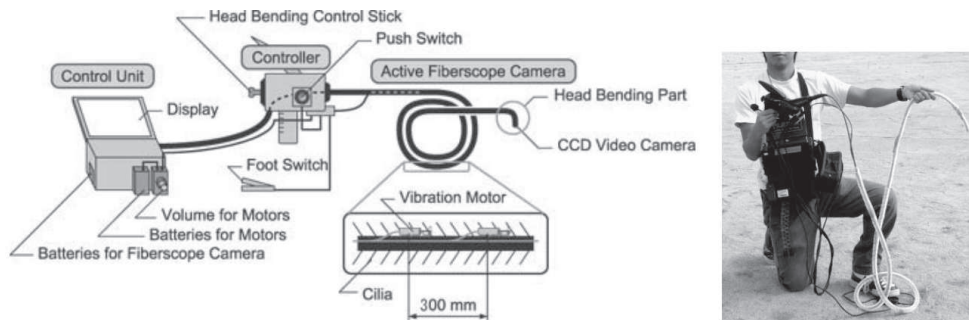
Das Prinzip der vibrationsgetriebenen Lokomotionserzeugung mit Borsten ermöglicht eine einfache, kompakte Bauweise unidirektionaler mobiler Roboter. Diese Eigenschaften machen es besonders für die Inspektionstechnik und Endoskopie interessant.

Verschiedene Konzepte für medizinische Endoskope können in [Kas06], [Men07] und [Dog10] gefunden werden. Die Berücksichtigung einer Energiezuführung über externe Magnetfelder [Fuk91], z. B. durch einen Magnetresonanztomographen, oder die Ermittlung der Bewegungseigenschaften von Borsten auf Materialien, die dem menschlichen Gewebe ähnlich sind [Kim05], sind Beispiele von zusätzlichen Herausforderungen in der Medizintechnik.

Röhren dienen dem Materialtransport in technischen Anlagen. Diese Leitungssysteme sind, durch äußere Einflüsse und die im Inneren transportierten Stoffe, Verschleiß ausgesetzt, was eine regelmäßige Wartung erforderlich macht. Die große Länge und eine oft schwer zugängliche Einbausituation eröffnen ein breites Einsatzfeld für autonome Inspektions- und Diagnosesysteme, die sich im Inneren der Leitungen fortbewegen können. Besonders für Röhren mit geringem Durchmesser ( $D = 10 - 25$  mm) besitzen vibrationsgetriebene Roboter großes Potential. Lokomotionssysteme für dieses Anwendungsfeld können in [Fuk91], [Rom93], [Sun01], [Cho02], [Roh05], [Wan08], [Gra10], [Ism12] und [Kak13] gefunden werden. Mithilfe von Borstenstrukturen können sich Roboter unabhängig von der Steigung der Röhre fortbewegen [Yag07], [Par08]. Flexible Borsten [Wan08] ermöglichen die Anpassung des Systems an wechselnde Durchmesser oder Beschädigungen. Enge Kurven können durchfahren werden. Potential für Roboter mit hohen Geschwindigkeiten bietet die Ausnutzung resonanter Eigenschaften der Lokomotionseinheit [Aos93].

Eine Anwendung von vibrationsgetriebener Lokomotion mit Borsten sind sogenannte halbaktive Endoskopkameras. Sie dienen der Inspektion von Trümmerfeldern, z. B. nach Erdbeben, mit dem Ziel der Rettung verschütteter Personen. Solche Kameras sind im Wesentlichen lange Schläuche mit einer in den Kopf integrierten Kamera, die durch Rettungspersonal von Hand in das Trümmerfeld eingeführt wird. Reibungskräfte und frontal vor der Kamera liegende Trümmerteile erschweren das Manövrieren. Die in [Hat07] und [Ish11] besprochenen Kameras, wurden durch die Anbringung von Borsten und Gleichstrommotoren mit Unwucht erweitert, wie in Abb. 3.5 zu sehen ist. Ein vibrierendes Kamerakabel mit Borsten erleichtert das Umfahren von frontalen Hindernissen [Hat07], verringert die Reibung [Isa06] und erzeugt eine zusätzliche Antriebskraft, wodurch die Reichweite erhöht wird.

### 3 Stand der Technik



**Abb. 3.5:** Vibrationsunterstützte Endoskopkamera für die Rettung verschütteter Personen [Hat07], © 2007 IEEE

## 3.2 Piezoelektrisch angetriebene Roboter für terrestrische Lokomotion

Roboter im Größenbereich von  $10 \text{ cm}^3$  bis  $100 \text{ cm}^3$  für eine zweidimensionale terrestrische Lokomotion sind Stand der Technik. Wie in Abschnitt 2.5 dargestellt, besitzen piezoelektrische Biegeaktoren ein besonderes Potential für diese Anwendung. Hier werden Roboter berücksichtigt, die mithilfe solcher Antriebe Kontinuumschwingungen erzeugen und diese inneren Vibrationen in eine Lokomotion wandeln.

Im Gegensatz zum vorhergehenden Abschnitt werden Fortbewegungsprinzipien, die in die Kategorien (A), (B), (E) und (F) aus Tab. 2.1 klassifiziert werden können, betrachtet. Diese Mechanismen zur Bewegungserzeugung sind auch aus piezoelektrischen Antriebssystemen mit unbegrenzter Auslenkung (Piezo-Motoren) bekannt. Sie können in quasi-statische und resonante Motoren unterteilt werden [Jan13]. Diese Klassifizierung wird hier auf mobile Roboter übertragen. Der charakteristische Zielkonflikt der Antriebstechnik zwischen Steuerbarkeit und Positionierungsgenauigkeit gegenüber der Stellgeschwindigkeit spiegelt sich auch in den vorgestellten Lokomotionssystemen wider. Anders als in mobilen Robotern befinden sich bei Motoren die piezoelektrischen Elemente im Stator, während der Rotor kein aktives Material enthält. Weitere Herausforderungen der Robotik, gegenüber der Antriebstechnik, sind eine mehrdimensionale Steuerbarkeit in veränderlichen Umgebungsbedingungen und die Energiezuführung zum bewegten Teil.

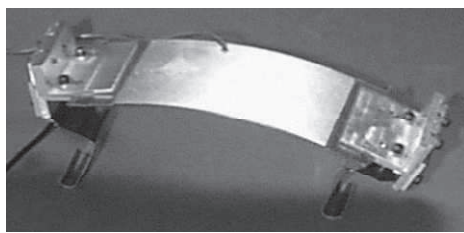
Anwendungen für die im Weiteren beschriebenen Lokomotionssysteme liegen in der Inspektion enger technischer Umgebungen, sowie Positionierungs- und Manipulationsaufgaben, z. B. in der Fertigung und Montage von mikrotechnischen Systemen [Ebe02], [Abb07], [Bre07] oder der Positionierung des Objektträgers in Mikroskopen [Bes87], [Bhi08].

### 3.2.1 Roboter ohne Ausnutzung von Resonanz

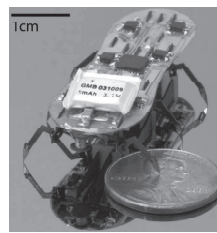
Die Frequenz der inneren Vibration nicht resonanter Roboter ist viel kleiner als die erste Eigenfrequenz  $f_0$  der Antriebs- oder Übertragungselemente. Vorteil dieser Systeme ist ihre sehr hohe Positionierungsgenauigkeit: „atomic resolution“ [Bes87]. „Die Genauigkeit eines wohl gestalteten quasi-statischen Antriebes kann unter 10 nm liegen und die Auflösung ist



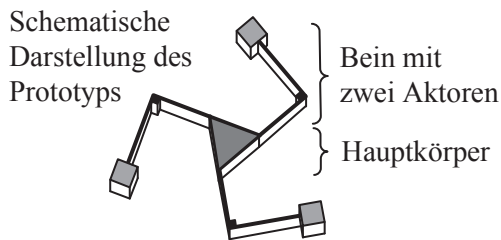
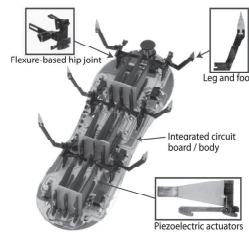
### 3.2 Piezoelektrisch angetriebene Roboter für terrestrische Lokomotion



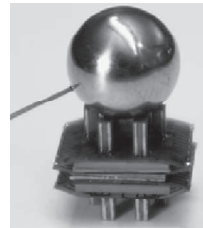
(a) [Lob01], © 2001 Elsevier  
100 x 25 x 30 mm<sup>3</sup>, 1 mm/s (37 Hz, 45 V)



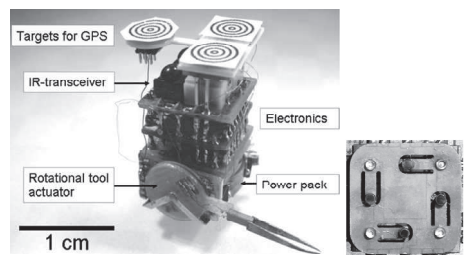
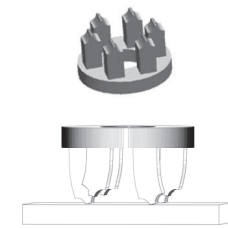
(b) [Bai11], © 2011 IEEE  
50 x 15 x 15 mm<sup>3</sup>, 30 mm/s (200 V)



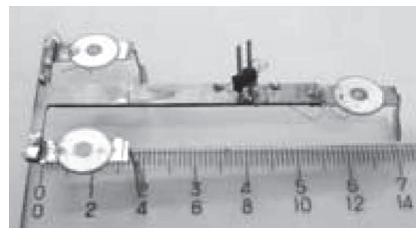
(c) nach [Rem97]  
60 x 60 x 20 mm<sup>3</sup>, 0,3 mm/s (40 V)



(d) [Sim02], © 2002 Urban Simu  
10 x 10 x 22 mm, 30 mm/s (5 kHz, 150 V)



(e) [Sni08], © 2008 Niklas Snis  
25 x 10 x 30 mm<sup>3</sup>, 0,17 mm/s (80 Hz, 28 V)



(f) [Li11], © 2011 IEEE  
70 x 35 x 15 mm<sup>3</sup> (10 V)

**Abb. 3.6:** Roboter und ihre piezoelektrischen Lokomotionseinheiten (Antriebsfrequenz deutlich kleiner Resonanzfrequenz): Abmessungen, Maximalgeschwindigkeit (bei Antriebsfrequenz, Spannungsamplitude)

nur begrenzt durch die der Ansteuerungsschaltung.<sup>1</sup> Durch die kleinen Schrittweiten und die Ansteuerung im Bereich von  $f = 0,01 \cdot f_0 \dots 0,1 \cdot f_0$  [Bhi08] können im Vergleich zu resonanten Systemen nur geringe Geschwindigkeiten erreicht werden. Beispiele für quasi-statische Piezo-Motoren sind die sogenannten Piezo-LEGS<sup>®</sup>-Motoren und Motoren, die nach dem Trägheitsprinzip arbeiten [Jan13]. Sie werden kommerziell vertrieben.

Piezoelektrische Biegeaktoren können verwendet werden, um eine periodische Abstandsänderung zweier Segmente mit Umgebungskontakt zu realisieren [Lob01]. Anders als in regenwurmartigen Robotern, werden die nicht symmetrischen Systemeigenschaften in [Lob01] durch ungleiche Beinlängen und eine ungleichmäßige Massenverteilung erreicht, siehe Abb. 3.6 (a). Das System besitzt dauerhaften Kontakt zum Untergrund und bewegt sich schrittweise durch periodische Normalkraftänderungen fort. In Abb. 3.6 (b) ist der biologisch inspirierte Roboter „HAMR<sup>3</sup>“ [Bai11] abgebildet. In dem 1,7 g schweren, autonomen System werden neun piezoelektrische Biegeaktoren benutzt, um mit sechs Beinen das

<sup>1</sup>Übersetzt nach: Niklas Snis, [Sni08], S. 33

### 3 Stand der Technik

Laufen von Insekten zu imitieren. Die Bewegung ist unidirektional. Ein ähnlicher Roboter mit höherer Beinanzahl wird in [Hof11] vorgestellt. Die Gestaltung solcher Lokomotionssysteme mit piezoelektrischen Biegeaktoren wurde bereits in [Smi92] behandelt.

Ein dem Laufen vergleichbares Bewegungsprinzip für flache Untergründe ist das Stick-Slip-Prinzip, siehe Abschnitt 2.2.4. Anstatt zwischen den statischen Haftphasen den Kontakt zum Untergrund aufzulösen, wird der Kontaktpunkt unter Wirkung von Gleitreibung verschoben. Die Anwendung des Prinzips in der mobilen Mikrorobotik wird in [Bre07] besprochen. In [Rem97] wird ein Roboter mit sechs Bimorph-Aktoren beschrieben, siehe Abb. 3.6 (c). In der Haftphase werden die Aktoren langsam ausgelenkt und der Roboter bewegt sich vorwärts. Darauf folgt die schnelle Rückbewegung der Aktoren. Die Kontaktpunkte gleiten. Der Hauptkörper behält seine Position bei. In Abb. 3.6 (d) und (e) werden Systeme abgebildet, die im Rahmen der europäischen Forschungsprojekte „MINIMAN“ und „MiCRoN“ entwickelt wurden. Die Beine des Roboters in [Sim02] sind Multilayer-Piezoaktoren, die eine Verkürzung und Biegung erlauben. Dadurch wird ein laufendes und ein Stick-Slip-Bewegungsregime ermöglicht. Ein dynamisches Modell zur Beschreibung solcher Roboter wird in [Eig10] gegeben.

Im Rahmen des „MiCRoN“-Projektes wurden mobile Roboter für die autonome Positionierung von ca. 60  $\mu\text{m}$  breiten Bauteilen entwickelt. Sie arbeiten nach dem Stick-Slip-Prinzip. Verschiedene Prototypen können Geschwindigkeiten von bis zu 0,4 mm/s erreichen mit Schrittweiten unterhalb von 10 nm [MiC06], [Est07]. Die Positionierungsgenauigkeit wird von der Auflösung des verwendeten Kamerasystems begrenzt. Ein Beispiel für einen solchen Roboter ist in Abb. 3.6 (e) dargestellt [Sni08]. Die dreibeinige Anordnung in Abb. 3.6 (f) soll durch zwei unterschiedliche Betriebsarten, Stick-Slip-Betrieb und eine resonante Ansteuerung, eine hohe Positionierungsgenauigkeit oder eine große Geschwindigkeit erreichen [Li11].

#### 3.2.2 Roboter auf Basis resonanter Kontinuumsschwingungen

Die inneren, resonanten Schwingungen werden durch Reibstöße [Glo95] der Übertragungselemente auf den Untergrund in die Lokomotion gewandelt. Die Schrittweite der Systeme ist von der konkreten Ausführung abhängig, liegt aber antriebsbedingt im Nano- bis Mikrometerbereich, weshalb die Bezeichnung Mirkostöße verwendet wird. Solche Roboter können, durch Antriebsfrequenzen von 1 kHz bis 100 kHz, sehr hohe Geschwindigkeiten erreichen, besitzen aber Nachteile in Steuerbarkeit und Positionierungsgenauigkeit. Übersichten über Piezo-Motoren, die nach diesem Prinzip arbeiten, können in [Uch98], [Uch04] und [Jan13] gefunden werden. Sie werden entsprechend ihres Funktionsprinzips als SWUM (standing wave ultrasonic motors, dt. Ultraschall-Stehwellen-Motoren) oder „woodpecker type“ (dt. Specht-Typen) bezeichnet. Frühe Ausführungen solcher Motoren sind in [Vas79], [Fle89] (Balkenschwingungen) und in [Kas92], [He98] (Plattenschwingungen) zu finden. Monomodale Antriebe nutzen eine Eigenform und schieben den Läufer stoßweise weiter. Bei bimodalen Aktoren werden eine Längs- und eine Biegemode miteinander überlagert, sodass der Kontaktpunkt zum Läufer eine elliptische Bahn beschreibt. Über die Phasenlage der Schwingung kann die Durchlaufungsrichtung der Trajektorien beeinflusst werden. Dazu müssen Longitudinal- und Transversalschwingung unabhängig voneinander, mit einzelnen Aktoren, ansteuerbar sein.

### 3.2 Piezoelektrisch angetriebene Roboter für terrestrische Lokomotion

Resonante Stehwellen-Motoren sind dank ihres einfachen Aufbaus und hoher Energieeffizienz, die nach [Uch98] theoretisch bis zu 98 % betragen kann, in verschiedenen Bauweisen kommerziell verfügbar.

In dieser Arbeit werden die vorgestellten Roboter nach der Geometrie des resonant schwingenden Kontinuums (Balken oder Platte) unterschieden.

#### **Balkenschwingungen**

Betrachtet werden Lokomotionssysteme, in denen piezoelektrische Antriebselemente benutzt werden, um Balken, die als Übertragungs- und Wirkelemente dienen, zu resonanten Schwingungen anzuregen. Solche Balken werden in dieser Arbeit als Beine bezeichnet. Die Antriebselemente sind in diesen integriert [DA97], [Ngu07], [Sni08], [I-S08] oder unmittelbar an ihnen befestigt [Dau95], [Asa95], [Vog01], [Aba07]. Es werden, außer in [Vog01] und [Aba07], mehrere Aktoren verwendet, um eine zweidimensionale Lokomotion zu erzeugen. Resonanz spielt bei diesen Systemen eine wichtige Rolle. Häufig wird die zweite Biegeeigenform der Balken, siehe Kapitel 5, genutzt [Asa95], [Dau95], [DA97], [I-S08], [Sni08].

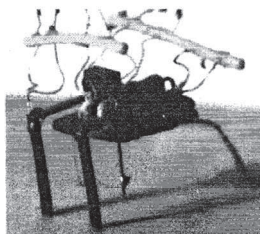
Das System in [DA97] besitzt zwei aktive Beine. Sie sind einmal abgewinkelt, siehe Abb. 3.7 (a), und werden jeweils von zwei Aktoren angetrieben. Zur Richtungssteuerung wurde eine phasenverschobene Ansteuerung der Aktoren angestrebt, die jedoch nicht den gewünschten Effekt erzielte. Das Bewegungsverhalten wird durch die Eigenformen der Beine bestimmt. Die Steuerbarkeit ist durch eine Frequenzvariation in der Nähe einer Resonanzstelle, in [DA97] bei 1 kHz, möglich.

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes „I-SWARM“ [I-S08] wurden nach diesem Prinzip autonome, miniaturisierte Roboter für Schwarmanwendungen entwickelt, siehe Abb. 3.7 (b). Der Aufbau ihrer Lokomotionseinheit kann in Abb. 3.7 (c) nachvollzogen werden [Sni08]. Sie besteht aus drei Beinen, die jeweils einen Polymerträger und einen mehrschichtigen PZT-Unimorph umfassen. Durch die Ansteuerung eines oder mehrerer Aktoren kann sich das System in der Ebene bewegen, indem die Beinenden periodisch an den Untergrund stoßen. Auf Basis dieses Moduls wurde die Lokomotionseinheit der I-SWARM-Agenten entwickelt, siehe Abb. 3.7 (b). Diese wird durch Biegen hergestellt, weshalb anstelle von Keramik ein piezoelektrischer Kunststoff (PVDF-TrFE) als Aktormaterial gewählt wurde [Edq09]. Aufgrund des Fertigungsprozesses können sich die Höhen der zweiten Eigenfrequenzen verschiedener Beine um bis zu 2 kHz [Sni08] unterscheiden. Sie müssen für jeden Agenten experimentell ermittelt werden. Die kleineren Abmessungen und höhere Masse eines I-SWARM-Agenten, im Vergleich zum Versuchssystem aus Abb. 3.7 (c), begründet den signifikanten Geschwindigkeitsunterschied. Ein System mit vergleichbarem vierbeinigen Antriebskonzept wird in [Dau95], Abb. 3.7 (d), vorgestellt.

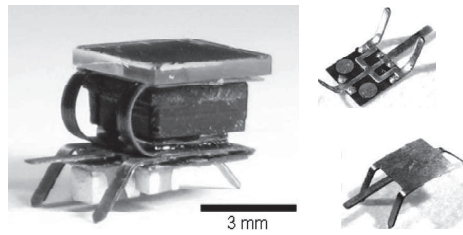
Das Konzept eines Roboters mit nur einem Aktor wird in [Vog01] angerissen. Ein experimenteller Nachweis der Ansteuerung spezifischer Beine durch die Verwendung eines kreisrunden piezoelektrischen Biegeaktors mit geviertelter Elektrode, siehe Abb. 3.7 (e), wird nicht gegeben. Das Konzept wird lediglich wegen seiner visuellen Ähnlichkeit zu den in Kapitel 5 behandelten Lokomotionssystemen abgebildet.

Mit dem Ziel, Agenten für miniaturisierte Roboterschwärme zu entwickeln, werden in [Ngu06] und [Ngu07] Prototypen vorgestellt, die drei Bimorph-Aktoren als Beine besitzen und sich durch periodisches Abstoßen von der festen Oberfläche fortbewegen. Die höchste

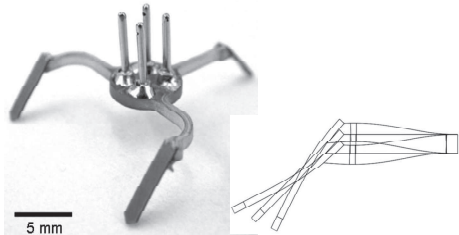
### 3 Stand der Technik



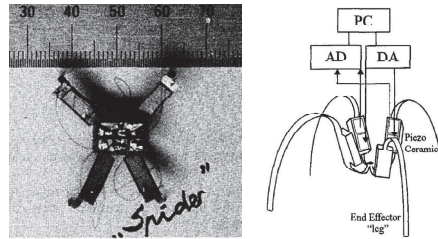
(a) [DA97], © 1997 IEEE  
 $30 \times 25 \times 20 \text{ mm}^3$ , 180 mm/s (1 kHz, 100 V)



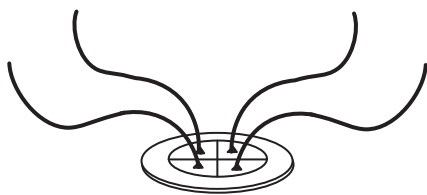
(b) [Sni08], © 2008 Niklas Snis  
 $6 \times 4 \times 4 \text{ mm}^3$ , 0,1 mm/s (25 kHz, 3,6 V)



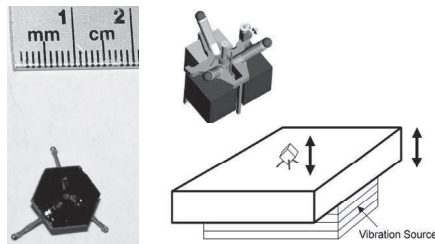
(c) [Sni08], © 2008 Niklas Snis  
 $20 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$ , 14 mm/s  
 (5,5 kHz, 5 V)



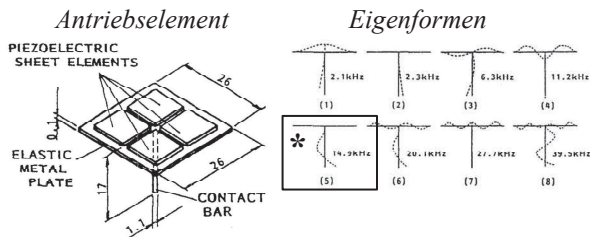
(d) [Dau95], © 1995 IEEE  
 $25 \times 22 \times 8 \text{ mm}^3$ , 25 mm/s  
 (0,5-15 kHz, 8-24 V)



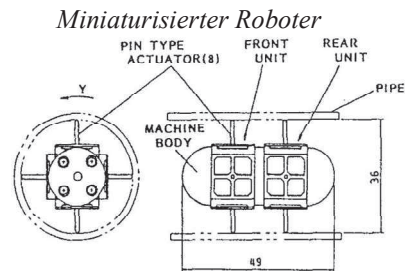
(e) nach [Vog01]  
 Konzept



(f) [Ngu07], © 2007 IEEE, [Ngu06], © 2006 IEEE  
 $12 \times 12 \times 10 \text{ mm}^3$   
 1,7 mm/s (4,5 kHz, 5 V, unbewegter Untergrund)  
 14 mm/s (3 kHz, 5 V, mit 250 Hz vibrierender Untergrund)



(g) [Asa95], © 1995 IEEE  
 $26 \times 26 \times 17 \text{ mm}^3$ ,  
 100 mm/s (\* 14,9 kHz, 20 V)



(h) [Asa95], © 1995 IEEE  
 $\text{Ø } 36 \text{ mm} \times 49 \text{ mm}$ , 143 mm/s (54,2 kHz, 20 V)

**Abb. 3.7:** Roboter, die resonante Biegeschwingungen von Balken nutzen, und ihre piezoelektrischen Antriebe: Abmessungen, Maximalgeschwindigkeit (bei Antriebsfrequenz, Spannungsamplitude)

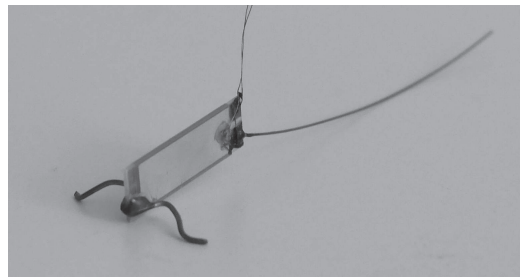


### 3.2 Piezoelektrisch angetriebene Roboter für terrestrische Lokomotion

Geschwindigkeit erreichen sie beim Betrieb auf einer synchronisierten, in vertikaler Richtung schwingenden Platte, siehe Abb. 3.7 (f). Die zusätzliche Kraftkomponente dient der Schwerkraftkompensation und ermöglicht eine schnellere Lokomotion.

In [Asa95] wird ein Antriebselement, Abb. 3.7 (g), vorgestellt und seine Anwendung in einem mobilen Roboter, Abb. 3.7 (h), besprochen. Das Antriebselement besteht aus einer Bronzeplatte, an deren Ober- und Unterseite jeweils vier Piezokeramikscheiben aufgeklebt sind, und einem Draht, der als Kontaktelement zum Untergrund dient. Durch eine phasenverschobene Ansteuerung der Keramikscheiben kann eine elliptische Trajektorie des Beinendpunktes erzeugt werden. Die höchste Lokomotionsgeschwindigkeit wird durch die Erregung der zweiten Eigenfrequenz des Drahtbeines erreicht, wenn es als einseitig eingespannter Balken betrachtet wird, vergl. Abb. 3.7 (g). Der dargestellte Prototyp besitzt acht solcher Antriebe.

Ausgangspunkt für die Betrachtungen in dieser Arbeit ist der sogenannte „Minch-Robot“ [Aba07], [Bec12]. Er ist in Abb. 3.8 dargestellt. Ein rechteckiger piezoelektrischer Biegeaktor bildet den Hauptkörper des Systems. Zwei Beine und ein passives Stützelement sind daran befestigt. Die Biegeschwingungen des Antriebes werden durch die Beine in elliptische Trajektorien an ihren Endpunkten gewandelt. Durch die Variation der Antriebsfrequenz können verschiedene Eigenformen der Beine erregt werden, wodurch die Steuerbarkeit des Systems ermöglicht wird. Neben FEM-Simulationen [Aba07] verdeutlicht ein Massenpunktmodell [Aba07], [Bec09] die wirksamen Effekte der vibrationsgetriebenen Lokomotion.



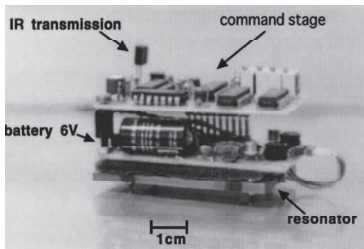
**Abb. 3.8:** „Minch-Robot“ [Aba07]:  $45 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$ , 540 mm/s (1,9 kHz, 10 V)

#### Plattenschwingungen

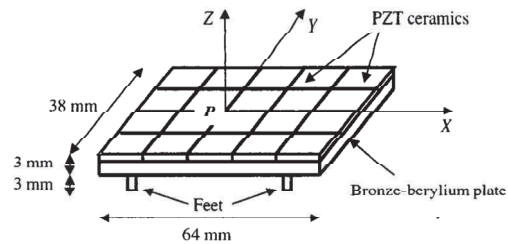
Die hier betrachteten Systeme bewegen sich durch die Anregung resonanter Plattenschwingungen, die durch die Beine und ihre Reibung zum Untergrund in eine Lokomotion gewandelt werden. Das Eigenschwingungsverhalten der Beine wird, anders als in [Asa95], nicht für die Fortbewegung genutzt. Die in [Fer97], [Roc01] und [Dem06] beschriebenen Antriebe bestehen aus einer Bronzeplatte, auf die eine  $4 \times 5$ -Matrix von Piezo-Scheiben geklebt ist, siehe Abb. 3.9 (b). Als Kontaktelemente zum Untergrund dienen vier Stahlbeine. Die Systeme können sich in der Ebene mit dem Freiheitsgrad drei bewegen. Für die Translationen werden die Piezoelemente so angesteuert, dass die Platte in ihrer dritten, vierten, fünften oder sechsten Eigenform schwingt. Die Stahlbeine sind nicht in den Schwingungsknoten oder Schwingungsbäuchen angebracht, damit sich die Endpunkte der Beine auf einer elliptischen Trajektorie bewegen, siehe Abb. 3.9 (e). Für eine Rotation werden degenerierte Moden, durch eine Ansteuerung außerhalb der Resonanz, erzeugt. Durch

### 3 Stand der Technik

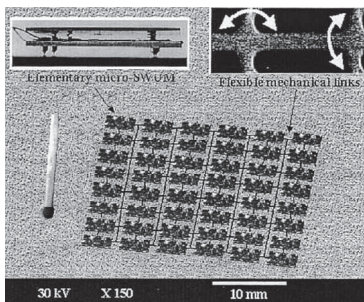
ihre geringe Schrittweite (40 nm [Roc01]) sind die Antriebe als bewegliche Objektträger in Mikroskopen geeignet. Sie können große Massen (10 kg [Roc01]) transportieren. Ein autonomer Roboter mit diesen Aktoren wird in Abb. 3.9 (a) vorgestellt. In [Fer03] wird ein miniaturisiertes System besprochen, dass aus 48 elastisch verbundenen Antrieben aufgebaut ist, siehe Abb. 3.9 (c). Ein ähnliches System für eindimensionale Lokomotion wird in [Son06] beschrieben, siehe Abb. 3.9 (d) und (e).



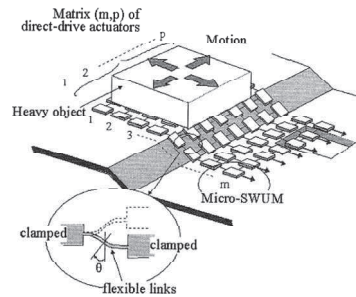
(a) [Fer97], © 1997 AIP Publishing LLC  
64 x 38 x 50 mm<sup>3</sup>, 200 mm/s (36,5 kHz, 20 V)



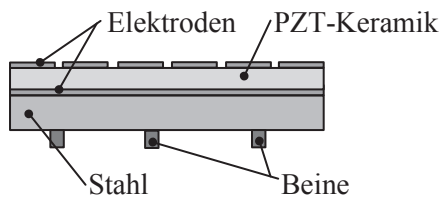
(b) [Roc01], © 2001 IEEE  
64 x 38 x 6 mm<sup>3</sup>, 20 mm/s (36 kHz, 7,5 V)



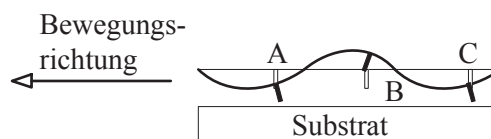
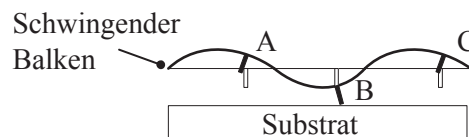
(c) [Fer03], © 2003 IEEE  
6,4 x 3,6 x 0,4 mm<sup>3</sup> (ein Antrieb der 8 x 6 - Matrix), 200 mm/s (110 kHz, 20 V)



Schematische Darstellung  
des Prototyps



(d) nach [Son06] 53 x 45 x 19 mm<sup>3</sup>,  
Vorwärts: 58,6 mm/s (14,2 kHz, 10 V, 3. Eigenmode)  
Rückwärts: 33,7 mm/s (24,7 kHz, 10 V, 4. Eigenmode)



(e) nach [Son06]  
Bewegungsprinzip der  
betrachten Roboter

**Abb. 3.9:** Roboter, die resonante Biegeschwingungen von Piezo-Metall-Laminatplatten nutzen: Abmessungen, Maximalgeschwindigkeit (bei Antriebsfrequenz, Spannungsamplitude)

### 3.3 Amphibische Roboter

In der Inspektionsrobotik werden Systeme benötigt, die robust gegenüber ihren Umgebungsbedingungen sind. Amphibische Roboter können terrestrische und aquatische Lokomotion durchführen. Bekannte Realisierungen makroskopischer amphibischer Roboter ( $L_c > 500$  mm) sind:

- Systeme mit Schwimmkörpern und getrennten Wirkelementen für die terrestrische und aquatische Lokomotion (amphibische Fahrzeuge);
- Systeme mit Schwimmkörpern und Wirkelementen, die die Antriebskraft sowohl an Land, als auch im Wasser erzeugen, z. B. Schaufelrad-Konstruktionen [Fre08], [Kle12] oder kugelförmige Roboter [VA11] und
- schlangenartige Systeme [Yu09], [HIB12].

Makroskopische Systeme benutzen meist klassische Antriebe, hauptsächlich Elektromotoren. Chu et al. [Chu12] und Guo et al. [Guo05], [Guo12] verdeutlichen das besondere Potential von „intelligenten Werkstoffen“ für die aquatische Lokomotion. In [Guo05] und [Guo12] werden Roboter vorgestellt, die sich durch das terrestrische Fortbewegungsprinzip Laufen am Grund des Wasser fortbewegen, aber auch aquatische Bewegungsprinzipien realisieren, um Hindernisse zu „überschwimmen“. Sie können als Inspektionssysteme für Gewässergründe dienen.

Zum Vergleich der hier betrachteten Roboter dienen die Reynolds-Zahlen  $Re = \rho L_c v_c / \eta$  ihrer Wirkelemente und die Bond-Zahlen  $Bo = \rho g L_c^2 / \sigma$  der Strukturen, die die Masse des Systems abstützen (Schwimmkörper). Ein Wirkelement erzeugt die Antriebskraft bezüglich der Flüssigkeit.  $L_c$  ist der Radius des Wirkelements und  $v_c$  seine Geschwindigkeit in der Flüssigkeit. Zur Bestimmung von  $Bo$  wird der Radius der Schwimmkörper als charakteristische Länge  $L_c$  verwendet.

Hier werden aquatische Systeme berücksichtigt, die sich an der Oberfläche von Flüssigkeiten fortbewegen können und ihre Lokomotion durch Bein-ähnliche Wirkelemente erzeugen, d. h. in ihrer Struktur und Größe Ähnlichkeit zu dem in Kapitel 6 vorgestellten System haben und das Potential besitzen, auch terrestrische Lokomotion durchzuführen.

Die Hydrodynamik von Tieren, die sich laufend an der Wasseroberfläche fortbewegen, wird in [Bus06] anhand zahlreicher Beispiele besprochen. Die Ergebnisse können auf technische Systeme übertragen werden. [Hu07] vergleicht miniaturisierte, technische Systeme für die Fortbewegung an der Wasseroberfläche mit natürlichen Pendants.

#### 3.3.1 Wasserläuferähnliche Roboter

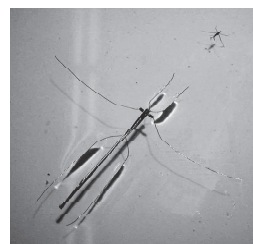
Der Wasserläufer, Abb. 3.10 (a), ist ein Insekt, das an den Randzonen von Gewässern lebt und über deren Oberfläche laufen kann, ohne sie zu penetrieren. Ermöglicht wird dies durch seine geringe Masse, sowie den geringen Durchmesser und nicht benetzenden Charakter seiner Beine. Die Gewichtskraft wird durch die Oberflächenspannung ( $Bo \ll 1$ ) gestützt. Die Fortbewegung wird durch rudende Bewegungen zweier Antriebsbeine erzeugt. Es kommt zu Wirbelablösungen und Kapillarwellen.

### 3 Stand der Technik

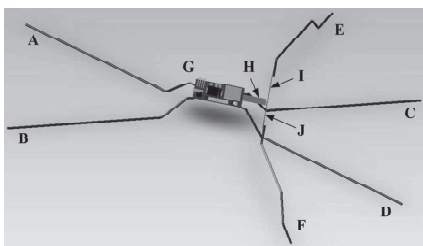
Eine technische Nachahmung der hydrodynamischen Eigenschaften des Wasserläufers wurde von Hu et al. 2003 vorgestellt [Hu03]. Das System besitzt vier Stütz- und zwei Antriebsbeine aus hydrophobischen Stahl mit 0,09 mm Durchmesser [Hu07], wie in Abb. 3.10 (b) dargestellt. Die Antriebsbeine werden durch einen Federspeicher angetrieben. Der Entwurf nach [Son07a], Abb. 3.10 (c), benutzt drei piezoelektrische Biegeaktoren, um die rudernde Bewegung der beiden Antriebsbeine zu erzeugen. Die Seitenantriebe werden in Resonanz betrieben. In [Wu11], Abb. 3.10 (d), wird ein System beschrieben, das sich durch seine Autonomie auszeichnet. Angetrieben von zwei Gleichstrommotoren kann es sich ferngesteuert mehr als zehn Stunden bewegen. Energiespeicher und Motorensteuerung sind integriert. Der Roboter aus [Ozc10], Abb. 3.10 (e), besitzt zwölf runde Tragstrukturen, wodurch eine Gesamtmasse von 53 g möglich ist.



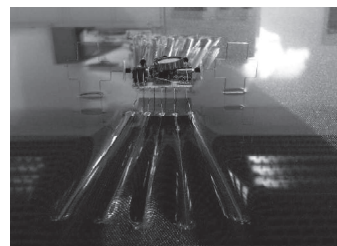
(a) Natürlicher Wasserläufer  
 1 x 0,3 cm<sup>2</sup>, 4,5 mg, 1500 mm/s (100 Hz)  
 $Re \approx 16, Bo = 0,5 \cdot 10^{-3}$



(b) [Hu03], © 2007 David Hu  
 13 x 12 cm<sup>2</sup>, 350 mg, 200 mm/s (60 Hz)  
 $Re = 18, Bo = 1 \cdot 10^{-3}$



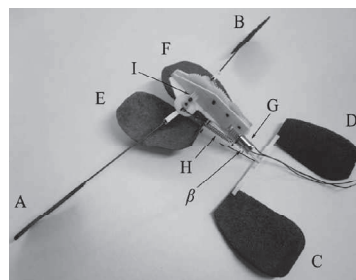
(c) [Son07a], © 2007 IEEE  
 12 x 12 cm<sup>2</sup>, 1 g, 30 mm/s (30 Hz);  
 $Re \approx 50, Bo = 4 \cdot 10^{-3}$



(d) [Wu11], CC BY 3.0 license  
 3 x 3 cm<sup>2</sup>, 6 g, 200 mm/s  
 $Re \approx 70, Bo = 3 \cdot 10^{-3}$



(e) [Ozc10], © 2010 IEEE  
 23 x 23 cm<sup>2</sup>, 22 g, 71,5 mm/s  
 $Re \approx 75, Bo = 137 \cdot 10^{-3}$



(f) [Zha12], © 2012 American Chemical Society  
 15 x 25 cm<sup>2</sup>, 10 g, 300 mm/s (0,3 Hz)  
 $Re = 100, Bo = 650$

**Abb. 3.10:** Wasserläufer-Insekt und Beispiele vergleichbarer Roboter mit ihren Kennwerten: Grundfläche, Masse, Spitzengeschwindigkeit (bei Ruderfrequenz), Reynolds-Zahl, Bond-Zahl



Entwicklungsrichtungen von wasserläuferähnlichen Robotern liegen vorallem in der Steigerung der Autonomie (Onboard-Elektronik), Mobilität (Geschwindigkeit, Betriebsdauer) und Traglast. Verschiedene Aktoren werden verwendet: thermische Antriebe [Tak05], [Hu07]; piezoelektrische Biegeaktoren [Son07a] und Gleichstrommotoren [Son07b], [Ozc10], [Wu11]. Zur Erzeugung eines nicht benetzenden Charakters der Beine werden Mikrostrukturierungen [Suz10] und hydrophobe Beschichtungen verwendet [Son07a], [Hu07], [Ozc10], [Wu11]. Zur Steigerung der Traglast durch die Oberflächenspannung, wird die Gesamtlänge der Stützstrukturen erhöht, z. B. durch eine höhere Beinanzahl [Son07a], [Suz10], [Wu11] oder spezielle Stützkonstruktionen [Ozc10]. Ein Überblick überk Forschungstendenzen kann in [Lic12] gewonnen werden.

Im Unterschied zu den genannten Systemen, werden in [Shi08] und [Zha12] springende wasserläuferähnliche Roboter besprochen. Der in [Shi08] beschriebene Roboter verdeutlicht die Möglichkeit, von der Wasseroberfläche bis zu 26 mm abzuspringen, ohne diese dabei zu durchdringen. Ein gespannter Federspeicher wird durch einen Aktor aus thermischer Formgedächtnislegierung schlagartig entspannt und überträgt seine Energie auf die Antriebsbeine, die die Sprungkraft erzeugen. Der Roboter in [Zha12], Abb. 3.10 (f), bewegt sich durch die Kombination aus Rudern und Springen. Es werden Schwimmkörper aus hydrophoben Nickel-Schaum verwendet. Dadurch wird die Tragkraft deutlich erhöht. Als Antrieb dient eine Kombination aus einem Federspeicher und einem Gleichstrommotor. Die besprochenen Roboter, außer [Zha12], nutzen wie der Wasserläufer die Oberflächenspannung der Flüssigkeit zur Abstützung ihrer Gewichtskraft ( $Bo \ll 1$ ) und bewegen sich rudern ohne Penetration der Oberfläche oder Benetzung der Beine fort. Ihre Reynolds-Zahlen liegen im Bereich von  $10^1$  bis  $10^2$ . Für die Erzeugung der Antriebskraft sind Trägheitskräfte wichtiger als Zähigkeitskräfte. Die vorgestellten wasserläuferähnlichen Roboter sind für die Lokomotion auf der Flüssigkeit gestaltet. Eine Anwendung auf festem Untergrund wird von den Autoren normalerweise nicht besprochen. Eine Erweiterung der Systeme für eine terrestrische Lokomotion wäre durch Anpassung der Antriebs- und Wirkelemente aber realisierbar.

#### 3.3.2 Basilikenähnliche Roboter

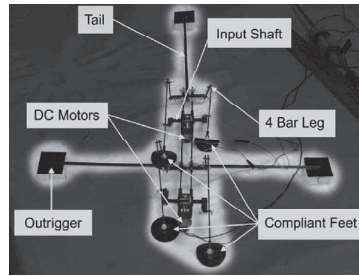
Ein Basilisk, Abb. 3.11 (a), ist ein terrestrisches Kriechtier, das sich, trotz seiner Größe und Masse, über die Oberfläche von Flüssigkeiten bewegen kann. Dazu läuft es auf seinen Hinterbeinen und schlägt seine Füße gegen die Wasseroberfläche. Es wird durch eine Kombination aus statischem und hydrodynamischem Auftrieb und der Trägheit des Wasser gestützt [Bus06].

Ein am Basiliken orientierter Roboter wird in [Flo06] und [Flo08] beschrieben. Das System wurde in verschiedenen Konfigurationen präsentiert. Das Beispiel in Abb. 3.11 (b) besitzt vier Beine und zwei Ausleger, die das Umkippen verhindern sollen. In Abhängigkeit der Eintauchtiefe, die sich aus Traglast und Antriebsfrequenz ergibt, kann der Roboter Geschwindigkeiten bis zu 80 mm/s erreichen.

### 3 Stand der Technik



(a) Foto: [Bus06], © 2006 Annual Reviews  
Daten: [Flo06]  
11-90 cm, 2-500 g, 1600 mm/s (5-10 Hz)  
 $Re \approx 2 \cdot 10^4, Bo = 500$



(b) [Flo08], © 2008 IEEE  
30 cm, 60 g, 80 mm/s (7-12 Hz)  
 $Re \approx 2 \cdot 10^4, Bo = 220$

**Abb. 3.11:** Natürlicher Basilisk (a) und Roboter mit vergleichbarem Lokomotionsprinzip (b): Länge, Masse, Geschwindigkeit (bei Schrittfrequenz), Reynolds-Zahl, Bond-Zahl

### 3.4 Folgerungen aus dem Stand der Technik

Die Übersicht zum Stand der Technik zeigt die breite Anwendung innerer Vibrationen als Antrieb für mobile Roboter in festen und flüssigen Umgebungen. Gleichstrommotoren und piezoelektrische Biegeaktoren werden häufig verwendet. Das Potential „intelligenter Mechaniken“ wird hingegen nicht ausgenutzt.

Roboter mit Borsten (Abschnitt 3.1) sind Beispiele, die die Transformation einer periodischen Erregung eines einzigen inneren Antriebes in eine gerichtete Bewegung realisieren. Ihr Wirkmechanismus wird meist auf einen richtungsabhängigen Reibungskoeffizienten reduziert. Dass Systeme mit elastischen Borsten sich auch auf glatten Untergründen, es gilt  $\mu_+ \approx \mu_-$ , fortbewegen können, wird kaum betrachtet.

Resonanz (Abschnitt 3.2) wird in vibrationsgetriebenen Systemen angewendet, um hohe Geschwindigkeiten zu erzielen und um eine frequenzabhängige Steuerbarkeit durch die Nutzung von Schwingungsformen zu realisieren. Meist werden eine Vielzahl von Antrieben in einem Roboter benutzt. Defizite zeigen sich im modellbasierten Entwurfsprozess. Es dominieren experimentelle, „Know-how“-basierte Lösungen.

Aquatische oder amphibische Systeme (Abschnitt 3.3), die mit einem einzigen Aktor steuerbare Bewegungen ausführen, sind dem Autor nicht bekannt. Resonanz wird lediglich zur Amplitudenvergrößerung der Antriebsschwingungen genutzt.

Es ergibt sich die Aufgabe der konsequenten Anwendung des Prinzips „intelligence by mechanics“ [Bli07] zur Realisierung von terrestrischen und aquatischen Lokomotionssystemen, die durch einen einzigen Aktor eine steuerbare Bewegung realisieren. Die Möglichkeit der Anwendung dieses Prinzips auf amphibische Systeme muss nachgewiesen werden. Einfache Modelle, die prinzipielle Bewegungsmechanismen verdeutlichen, werden benötigt.

## 4 Terrestrische Roboter mit Borsten für unidirektionale Lokomotion

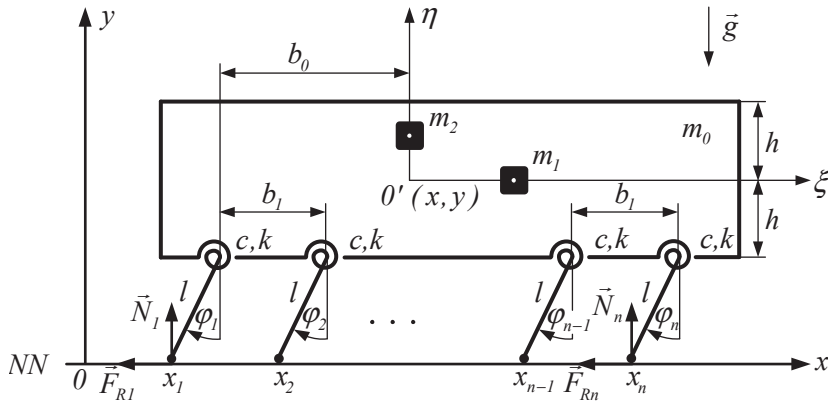
Borsten werden benutzt, um in vibrationsgetriebenen Bewegungssystemen richtungsabhängige Reibungseigenschaften zu erzeugen. Die Analyse des Standes der Technik hat die breite Anwendung von Borsten in terrestrischen mobilen Robotern verdeutlicht. Defizite zeigten sich in der modellbasierten Betrachtung solcher Lokomotionssysteme. Die Wirkung von Borsten wird häufig durch anisotrope Reibungskoeffizienten oder geometrische Zwangsbedingungen modelliert. Damit kann der Wirkmechanismus von elastischen Borsten auf glattem Untergrund nicht untersucht werden.

Hier setzt das vorliegende Kapitel an. Am Beispiel einsegmentiger Systeme, die ihre Antriebskraft durch die Vibration innerer Massen erzeugen, werden die dynamischen Wirkmechanismen von Borsten mit unterschiedlichen Konstruktionen verglichen. Ein mechanisches Modell wird entwickelt und numerisch untersucht. Das Bewegungsverhalten wird analysiert, um eine optimale Konfiguration und effektive Ansteuerung des inneren Antriebes zu erzielen. Die Bestimmung des Einflusses wichtiger Systemparameter auf die Geschwindigkeit ist ein Ziel. Ergänzt werden die Simulationen durch experimentelle Untersuchungen.

Darauf basierend wird ein neuartiger Prototyp für die Fortbewegung in Röhren vorgestellt.

## 4.1 Mechanisches Modell einsegmentiger Roboter mit Borsten

Ausgehend von den wesentlichen Systemelementen, die das Lokomotionsverhalten beeinflussen, wird das in Abb. 4.1 dargestellte Modell entwickelt. Es besteht aus einem Hauptkörper der Masse  $m_0$ , zwei bewegten inneren Massen  $m_1$  und  $m_2$  und einer Anzahl  $n$  von masselosen Stäben der Länge  $l$ . Sie sind durch rotatorische Feder- und Dämpfungselemente mit den Konstanten  $c$  und  $k$  drehbar mit dem Hauptkörper verbunden. Diese Stäbe dienen als Übertragungselemente der inneren Schwingungen zum Untergrund und sind Modelle von linear-elastisch verformbaren Borsten. An den Kontaktstellen wirke Coulombsche Reibung  $\vec{F}_R$ . Der Hauptkörper des Systems bewege sich ausschließlich translatorisch, wodurch  $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_n$  gilt und die Lage der Stäbe relativ zum Hauptkörper durch den Winkel  $\varphi$  beschrieben werden kann. Es wird angenommen, dass die Normalkraft in allen Kontaktpunkten gleich groß ist. Zur Beschreibung des Systemverhaltens werden zwei kartesische Koordinatensysteme eingeführt: das raumfeste Inertialsystem  $(0xy)$  und ein körperfestes System  $(0'\xi\eta)$ . Die Koordinaten  $x$  und  $y$  beschreiben die Lage des Punktes  $0'$ . Die Bewegung der inneren Massen  $m_1$  und  $m_2$  wird durch die kinematischen Bedingungen  $\eta(t)$  und  $\xi(t)$  gegeben. Es wirke Schwerkraft mit der Schwerebeschleunigung  $g$ . Die Bewegungsdifferentialgleichungen werden mithilfe der Lagrangeschen Gleichung zweiter Art (4.1) hergeleitet.



**Abb. 4.1:** Mehrkörpersystemmodell eines vibrationsgetriebenen Roboters mit Borsten

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = - \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} + Q_i, \quad i = 1, 2 \quad (4.1)$$

Die Bewegung des System mit dem Freiheitsgrad zwei wird anhand der Koordinaten  $x$  und  $\varphi$  beschrieben. Zur Bestimmung der Lagrange-Funktion  $L$  werden die kinetische Energie  $T$  und potentielle Energie  $U$  benötigt, wobei  $\varphi_0$  die Lage der masselosen Stäbe im unbelasteten Zustand kennzeichnet.

$$T = \frac{m_0}{2} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{m_1}{2} [(\dot{x} + \dot{\xi})^2 + \dot{y}^2] + \frac{m_2}{2} [\dot{x}^2 + (\dot{y} + \dot{\eta})^2] \quad (4.2)$$

$$U = \frac{nc}{2} (\varphi - \varphi_0)^2 + (m_0 + m_1)gy + m_2g(y + \eta) \quad (4.3)$$

#### 4.1 Mechanisches Modell einsegmentiger Roboter mit Borsten

Die Lage-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungskoordinaten des Hauptkörpers in vertikaler Richtung sind

$$\begin{aligned} y &= h + l \cos \varphi, \\ \dot{y} &= -l\dot{\varphi} \sin \varphi, \\ \ddot{y} &= -l\ddot{\varphi} \sin \varphi - l\dot{\varphi}^2 \cos \varphi. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Unter Berücksichtigung von (4.4) ergibt sich für die Lagrange-Funktion  $L = T - U$ :

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2}(m_0 + m_1 + m_2)(\dot{x}^2 + l^2\dot{\varphi}^2 \sin^2 \varphi) + \frac{m_1}{2}(2\dot{x}\dot{\xi} + \dot{\xi}^2) + \frac{m_2}{2}(-2l\dot{\eta}\dot{\varphi} \sin \varphi + \dot{\eta}^2) \\ &\quad - \frac{nc}{2}(\varphi - \varphi_0)^2 - (m_0 + m_1 + m_2)g(h + l \cos \varphi) - m_2g\eta. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Die Dissipationsfunktion ist

$$D = \frac{nk}{2}\dot{\varphi}^2. \quad (4.6)$$

Die verallgemeinerten, nicht potentiellen Kräfte  $Q_i$  umfassen die zwischen Roboter und Untergrund wirkenden Gleitreibungskräfte und ergeben sich aus

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \vec{F}_{Rj} \partial_i \vec{r}_{FRj}. \quad (4.7)$$

$\vec{r}_{FRj}$  ist der Ortsvektor zum Angriffspunkt von  $\vec{F}_{Rj}$ . Die Reibungskräfte an jedem Kontaktpunkt haben die folgende Form:

$$\vec{F}_{Rj} = -\mu \frac{1}{n} |\vec{N}| \text{sign}(\dot{x}_j) \vec{e}_x. \quad (4.8)$$

Durch Anwendung des Impulssatzes kann, unter der Annahme der gleichmäßigen Normalkraftverteilung, die Summe der Normalkräfte  $N = |\vec{N}|$  zwischen Untergrund und Roboter bestimmt werden. Für die  $y$ -Richtung ergibt sich

$$(m_0 + m_1 + m_2)\ddot{y}_S = -(m_0 + m_1 + m_2)g + N. \quad (4.9)$$

Mit

$$y_S = \frac{\sum_{k=0}^2 y_k m_k}{\sum_{k=0}^2 m_k} = \frac{(m_0 + m_1)y + m_2(y + \eta)}{m_0 + m_1 + m_2} \quad (4.10)$$

zur Bestimmung der  $y$ -Koordinate des Massenschwerpunktes, folgt

$$N = (m_0 + m_1 + m_2)(g - l\ddot{\varphi} \sin \varphi - l\dot{\varphi}^2 \cos \varphi) + m_2\ddot{\eta}. \quad (4.11)$$

Die Koordinate  $x_j$  des Ortsvektors  $\vec{r}_{FRj} = x_j \vec{e}_x$  ist

$$x_j = x - l \sin \varphi - b_0 + (j-1)b_1, \quad j = 1, \dots, n. \quad (4.12)$$

Aufgrund der kinematischen Bedingung der rein translatorischen Bewegung des Hauptkörpers haben alle Kontaktpunkte die gleiche Geschwindigkeit

$$\dot{x}_j = \dot{x} - l\dot{\varphi} \cos \varphi. \quad (4.13)$$

#### 4 Terrestrische Roboter mit Borsten für unidirektionale Lokomotion

Für die Modellierung trockener anisotroper Reibung gilt

$$\mu = \begin{cases} \mu_-, & \text{wenn } \dot{x} - l\dot{\phi} \cos \varphi < 0, \\ \mu_+, & \text{wenn } \dot{x} - l\dot{\phi} \cos \varphi > 0. \end{cases} \quad (4.14)$$

Aus der Lagrange-Gleichung (4.1) ergeben sich, mit  $L$  (4.5),  $D$  (4.6) und  $Q_i$  (4.7), nach der Durchführung der notwendigen Ableitungen die Bewegungsdifferentialgleichungen für  $x$  und  $\varphi$ :

$$(m_0 + m_1 + m_2)\ddot{x} + m_1\ddot{\xi} = -\mu N \text{sign}(\dot{x}_j), \quad (4.15)$$

$$(m_0 + m_1 + m_2)(l^2\ddot{\phi} \sin^2 \varphi + l^2\dot{\phi}^2 \sin \varphi \cos \varphi) - m_2 l \ddot{\eta} \sin \varphi + nc(\varphi - \varphi_0) - (m_0 + m_1 + m_2)gl \sin \varphi = -nk\dot{\phi} + \mu N l \cos \varphi \text{sign}(\dot{x}_j). \quad (4.16)$$

Durch Umstellen und mit (4.11), (4.12) sowie der Gesamtmasse des Roboters

$$m_R = m_0 + m_1 + m_2 \quad (4.17)$$

folgen die beiden Bewegungsdifferentialgleichungen in der für die numerischen Untersuchungen verwendeten Form:

$$\ddot{x} + \frac{m_1}{m_R}\ddot{\xi} = -\mu \left[ g - l\ddot{\phi} \sin \varphi - l\dot{\phi}^2 \cos \varphi + \frac{m_2}{m_R}\ddot{\eta} \right] \left[ \text{sign}(\dot{x} - l\dot{\phi} \cos \varphi) \right], \quad (4.18)$$

$$\left[ \ddot{\phi} \sin \varphi + \dot{\phi}^2 \cos \varphi - \frac{g}{l} - \frac{m_2}{m_R l} \ddot{\eta} \right] \left[ \sin \varphi + \mu \cos \varphi \text{sign}(\dot{x} - l\dot{\phi} \cos \varphi) \right] + \frac{nk}{m_R l^2} \dot{\phi} + \frac{nc}{m_R l^2} (\varphi - \varphi_0) = 0. \quad (4.19)$$

## 4.2 Simulation des Mehrkörpermodells und Diskussion der Ergebnisse

Die Wirkmechanismen von Borsten werden in Abhängigkeit ihrer Parameter und der Richtung der inneren Erregung anhand zweier Konfigurationen, die ferner mit Modell I und Modell II bezeichnet werden, untersucht. Sie bilden Spezialfälle des vorgestellten Mehrkörpermodells und sind in Abb. 4.2 schematisch dargestellt.



**Abb. 4.2:** Konfigurationen des Mehrkörpermodells aus Abb. 4.1 für die Simulationen

Für die numerischen Untersuchungen werden die Zahlenwerte aus Tab. 4.1 benutzt. Sie beziehen sich auf die Parameter des experimentellen Systems, siehe Tab. 4.2. Die numerische Integration von (4.18) und (4.19) erfolgt unter Verwendung des Programmpaketes *MATLAB*<sup>®</sup>2012b / *Simulink*<sup>®</sup>8.0.

### 4.2.1 Aufbau und Bewegungsverhalten von Modell I

Mit Modell I werden Systeme mit kurzen, steifen und spitzen Borsten dargestellt, die sich auf rauem Untergrund fortbewegen. Die Vorwärtsbewegung wird im Vergleich zur Rückwärtsbewegung begünstigt. Die innere Erregung erfolgt in Bewegungsrichtung.

Das Bewegungsverhalten ist in Abb. 4.3 dargestellt. Die hohe Steifigkeit und geringe Länge der Borsten, sowie die Vibration der inneren Masse in horizontaler Richtung führen zu

$$\varphi \approx \varphi_0, \forall t.$$

$x(t)$  und  $x_j(t)$  verlaufen für die gewählten Parameter parallel. Die Erregung  $\xi(t) = A \sin(\Omega t)$  der inneren Masse  $m_1$  hat keine Wirkung auf die Normalkraft  $N$ . Sie ist konstant, bis auf Peaks, die beim Vorzeichenwechsel der als Sprungfunktion implementierten Signum-Funktion entstehen, jedoch keinen wesentlichen Einfluss auf die Lokomotion haben. Die Fortbewegung des Systems wird durch die Anisotropie des Reibungskoeffizienten  $\mu_+ < \mu_-$  bestimmt. Das System wird durch  $\ddot{\xi}(t) = -m_1 A \Omega^2 \sin(\Omega t)$  periodisch in positive und negative Richtung beschleunigt. Der Betrag der Reibungskraft während der Bewegung in positive Richtung ist größer als der in negative Richtung, wodurch sich das System vorwärts bewegt. Die Überlagerung der inneren Antriebsschwingung und der Ortsveränderung des Gesamtsystems kann in den Verläufen von  $x(t)$  und  $x_j(t)$  nachvollzogen werden.

### 4.2.2 Aufbau und Bewegungsverhalten von Modell II

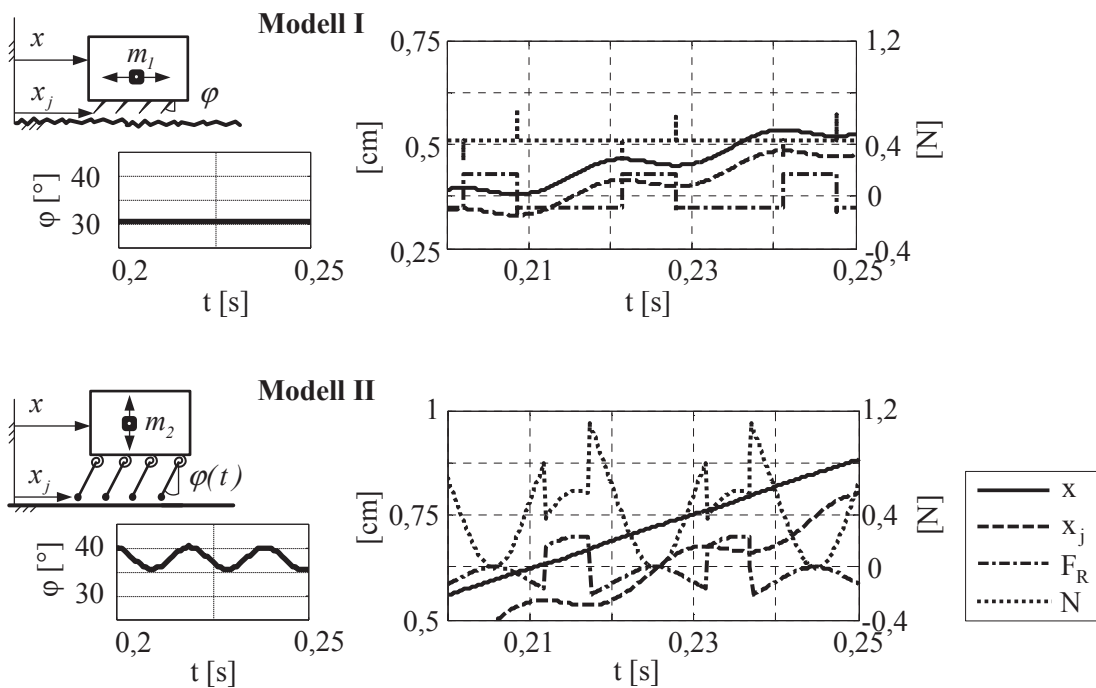
Im Gegensatz zu Modell I wird Modell II für die Analyse der Lokomotion von Systemen mit langen und elastischen Borsten und einer inneren Erregung in vertikaler Richtung verwendet. Um den Wirkmechanismus zu verdeutlichen, wird der Reibungskoeffizient isotrop gewählt:  $\mu_+ = \mu_-$ . Die Lokomotion des Systems wird durch die Normalkraft bestimmt. Wie in Abb. 4.3 zu sehen, führt die vertikale Schwingung  $\eta(t) = A \sin(\Omega t)$  der inneren Masse  $m_2$  zu einer Auf- und Abbewegung des Hauptkörpers. Der Neigungswinkel  $\varphi(t)$  der Borsten und die Normalkraft  $N(t)$  ändern sich periodisch. Die Kontaktpunkte zum Untergrund  $x_j(t)$  bewegen sich durch die Vertikalbewegung des Hauptkörpers periodisch vor und zurück. Aus der Schwingung der Normalkraft resultieren die nicht symmetrischen Reibungsverhältnisse über eine Periodendauer. Diese Unsymmetrie ist die Ursache der Lokomotion des Gesamtsystems  $x(t)$ .

**Tab. 4.1:** Parameter für die Simulation der Modelle I und II

Modell		I	II	
<i>Strukturelle Parameter</i>				
Hauptkörpermasse	$m_0$	40	40	g
Erregermasse	$m_1 = m_2$	2	2	g
Borstenlänge	$l$	1	10	mm
Borstenwinkel	$\varphi_0$	30	30	°
Steifigkeit	$n \cdot c$	0,2	0,02	Nm
Dämpfungskoeffizient	$n \cdot k$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	kg m <sup>2</sup> /s
Gleitreibungskoeffizienten	$\mu_+$	0,2	0,2	
	$\mu_-$	0,4	0,2	
<i>Kinematische Steuerung</i>				
Erregungsfunktionen	$\xi(t)$	$A \sin(\Omega t)$	0	mm
	$\eta(t)$	0	$A \sin(\Omega t)$	mm
Erregungsamplitude	$A$	5	5	mm
Erregungsfrequenz	$f$	50	50	Hz



## 4.2 Simulation des Mehrkörpermodells und Diskussion der Ergebnisse



**Abb. 4.3:** Verlauf von charakteristischen Bewegungsgrößen:  $\varphi$  - Neigungswinkel der Borsten zur Vertikalen,  $x$  - Position des Systems,  $x_j$  - Koordinate eines Borstenendpunktes im Kontakt zum Untergrund,  $F_R$  - Coulombsche Reibungskraft,  $N$  - Normalkraft zwischen Borstenendpunkten und Untergrund [Bec14]

### 4.2.3 Parameterstudien zur Geschwindigkeit beider Modelle

Es werden Simulationsserien der beiden Modellkonfigurationen durchgeführt. Ziel der Parameterstudien ist es, die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von Konstruktions- und Ansteuerungsparametern zu finden. Als zu untersuchende Parameter werden festgelegt:

- der Reibungskoeffizient  $\mu$ ,
- die Frequenz  $f = \Omega/2\pi$  der inneren Erregungen  $\xi(t)$  oder  $\eta(t)$ ,
- die Masse  $m_0$  des Hauptkörpers des Systems,
- der unbelastete Neigungswinkel  $\varphi_0$  der Borsten bezüglich der Vertikalen,
- die Borstenlänge  $l$  und
- die Steifigkeit  $c$  der  $n$  linearen Drehfedern, die die Borsten und den Hauptkörper verbinden.

Während ein einzelner Parameter variiert wird, behalten die anderen die in Tab. 4.1 gegebenen Werte bei. Die Ergebnisse der Studie werden in Abb. 4.4 dargestellt. Die Modellierung in Abschnitt 4.1 erfolgte für dauerhaften Kontakt des Systems zum Untergrund. Es gilt

$$N \geq 0, \forall t. \quad (4.20)$$

Ergebnisse, die dieser Bedingung gerecht werden, sind durch die durchgezogene Linie in Abb. 4.4 dargestellt. Mit der gestrichelten Linie werden Ergebnisse abgebildet, für die das simulierte Modell seine Gültigkeit verliert, da der berechnete Verlauf der Reaktionskraft  $N$  auch negative Werte umfasst. Ein physisches System würde den Kontakt zum Untergrund verlieren. Für die Flugphase existieren keine Bodenreaktionskräfte. Die resultierenden Effekte der „nicht glatten Mechanik“ [Pfe06], [Stu09], wie „Reibstöße“ [Glo95], werden in dieser Arbeit nicht modelliert. Die gestrichelt Linie kann als Trendlinie verstanden werden. Die experimentellen Untersuchungen in Abschnitt 4.4 sollen hier die Simulationsergebnisse ergänzen.

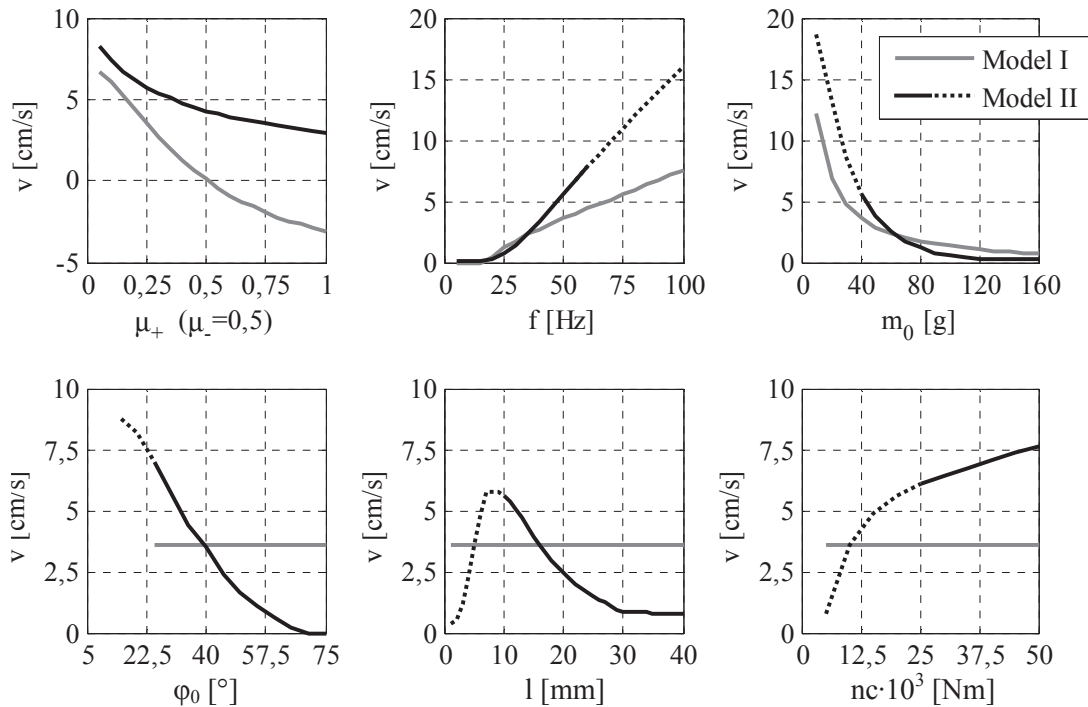
Aus den numerischen Parameterstudien wird ersichtlich, dass eine Erhöhung der Erregungsfrequenz  $f$  oder eine Verringerung der Hauptkörpermasse  $m_0$  zu einer Steigerung der Geschwindigkeit  $v$  beider Modellkonfigurationen führt. Ein geringer Reibungskoeffizient in Vorwärtsrichtung  $\mu_+$  ermöglicht eine höhere Geschwindigkeit.

Während das Bewegungsverhalten von Modell I nur durch die Reibungsverhältnisse bestimmt wird, erweist sich Modell II als robuster gegenüber Änderungen der Reibungskoeffizienten. Es bewegt sich auch dann noch vorwärts, wenn der Reibungsbeiwert in positive Richtung deutlich größer als in negative Richtung ist  $\mu_- > \mu_+$ . Dieser Effekt resultiert aus dem Wirkmechanismus, der auf periodischen Normalkraftänderungen beruht. Das ist ein wesentlicher Vorteil von Systemen mit elastischen Borsten.

Modell I ist so gestaltet, dass  $\varphi \approx \text{konst.}$  gilt. Dadurch haben  $\varphi_0$ ,  $l$  und  $nc$  keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit von Modell I wird im untersuchten Parameterintervall exklusiv durch die Anisotropie des Reibungskoeffizienten, die Masse des Systems und die Parameter der inneren Erregung bestimmt.

## 4.2 Simulation des Mehrkörpermodells und Diskussion der Ergebnisse

Die Simulationen von Modell II zeigen einen starken Zusammenhang zwischen Borstenparametern und Geschwindigkeit. Wenn die anderen Parameter jeweils konstant gehalten werden, führt eine Verringerung von  $\varphi_0$  und  $l$ , sowie eine Erhöhung von  $nc$  tendenziell zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit. Eine solche Änderung der Parameter erhöht die Steifigkeit des Systems in vertikale Richtung, wodurch die Auf- und Abbewegung des Hauptkörpers reduziert wird.

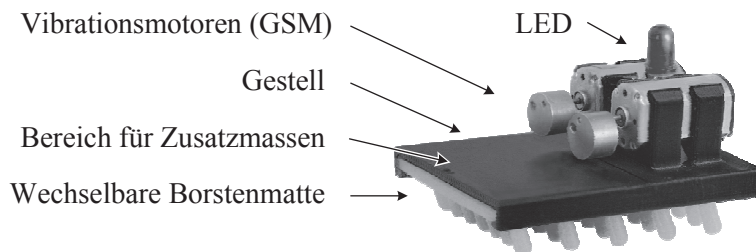


**Abb. 4.4:** Numerisch ermittelte Abhängigkeit der Geschwindigkeit von Erregungsfrequenz und Modellparametern: Durchgehende Linie - System hat dauerhaften Kontakt zum Untergrund ( $N \geq 0, \forall t$ ); Gestrichelte Linie - Modell verliert seine Gültigkeit, da der numerisch berechnete Normalkraftverlauf auch negative Werte umfasst

### 4.3 Aufbau des Experimentalsystems mit Borsten

Wie im vorhergehenden Abschnitt gezeigt, verlieren die Simulationen für bestimmte Parameterwerte ihre Gültigkeit. Experimentelle Untersuchungen sollen weitere Ergebnisse liefern.

Das in Abb. 4.5 dargestellte System wird verwendet. Es entspricht der körperlichen Umsetzung von Modell II aus dem vorhergehenden Abschnitt. Die Elastizität der Borsten ist im Unterschied zum Modell kontinuierlich über die Borstenlänge verteilt. Das Experimentalsystem besteht aus einem Gestell, einer Borstenmatte mit 35 Borsten, zwei Vibrationsmotoren, einer Leuchtdiode (LED) und Steckverbindern für die elektrische Energieversorgung. Das additiv gefertigte Gestell besteht aus Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS). Ein Bereich für die Anbringung von Zusatzmassen ist vorhanden. Die Gleichstrommotoren rotieren die Exzentermassen synchronisiert mit einer Phasenverschiebung von  $180^\circ$  in entgegengesetzte Richtung. Sie sind im Gestell linear verschiebbar, um auch bei der Verwendung von Zusatzmassen die Antriebskraft unmittelbar über dem Schwerpunkt einzuleiten. Dadurch wird die Verkippung des Systems in Längsrichtung minimiert. Für die Parameterstudien kann die Borstenmatte ausgetauscht werden, um den Zusammenhang zwischen maximaler Lokomotionsgeschwindigkeit und Borstenparametern, wie Länge, Neigungswinkel und Shore-A-Härten<sup>1</sup> der verwendeten Silikone zu untersuchen. Es werden die Silikone ALPA SIL 32 und ALPA SIL Extra<sup>2</sup> mit Shore-A-Härten von ca. 32 und 20 verwendet. Die verschiedenen Borstenstrukturen werden durch Gießen und Aushärten in Gussformen aus ABS hergestellt. Die Versuche werden auf einer Glasplatte durchgeführt. Kraftmessungen am experimentellen System haben einen isotropen Gleitreibungskoeffizienten von  $\mu_+ = \mu_- = 0,9$  zwischen Glas und Silikon ergeben. Die Parameter des Experimentalsystems sind in Tab. 4.2 gelistet.



**Abb. 4.5:** Experimentalsystem zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens von vibrationsgetriebenen Robotern mit elastischen Borsten auf glatten Untergründen  $\mu_+ = \mu_-$  [Bec14]

<sup>1</sup>Nach DIN 53505 und DIN 7868

<sup>2</sup>Zulieferer: ALPINA - Technische Produkte GmbH, Deutschland

**Tab. 4.2:** Parameter des Experimentalsystems

Länge x Breite x Höhe	$L \times B \times H$	$60 \times 40 \times 35$	$\text{mm}^3$
Gesamtmasse	$m_R$	42	g
Unwuchtmasse eines Motors	$m_e$	2	g
Exzentrizität	$e$	2,7	mm
Borstenlänge	$l$	8	mm
Borstendurchmesser	$d$	3	mm
Borstenwinkel	$\varphi_0$	30	°
Gleitreibungskoeffizienten	$\mu_+ = \mu_-$	0,9	
Gleichspannung	$U$	2,4	V
Drehzahl	$N$	3180	U/min
Erregungsfrequenz	$f$	53	Hz

## 4.4 Experimentelle Untersuchungen des Systems mit Borsten

Ziel ist die Analyse des Bewegungsverhaltens und die Ermittlung des Zusammenhangs von Systemparametern und der Lokomotionsgeschwindigkeit. Die Untersuchungen stützen und erweitern die modellbasiert gewonnenen Erkenntnisse.

Für die Bewegungserzeugung werden die Motoren mit Gleichspannungen gleicher Amplitude und verschiedenen Vorzeichen angesteuert. Durch den Effekt der Selbstsynchronisation [Ble00] kann eine nahezu harmonische Trägheitskraftwirkung in vertikaler Richtung erreicht werden.

### 4.4.1 Bewegungsverhalten des Systems mit Borsten

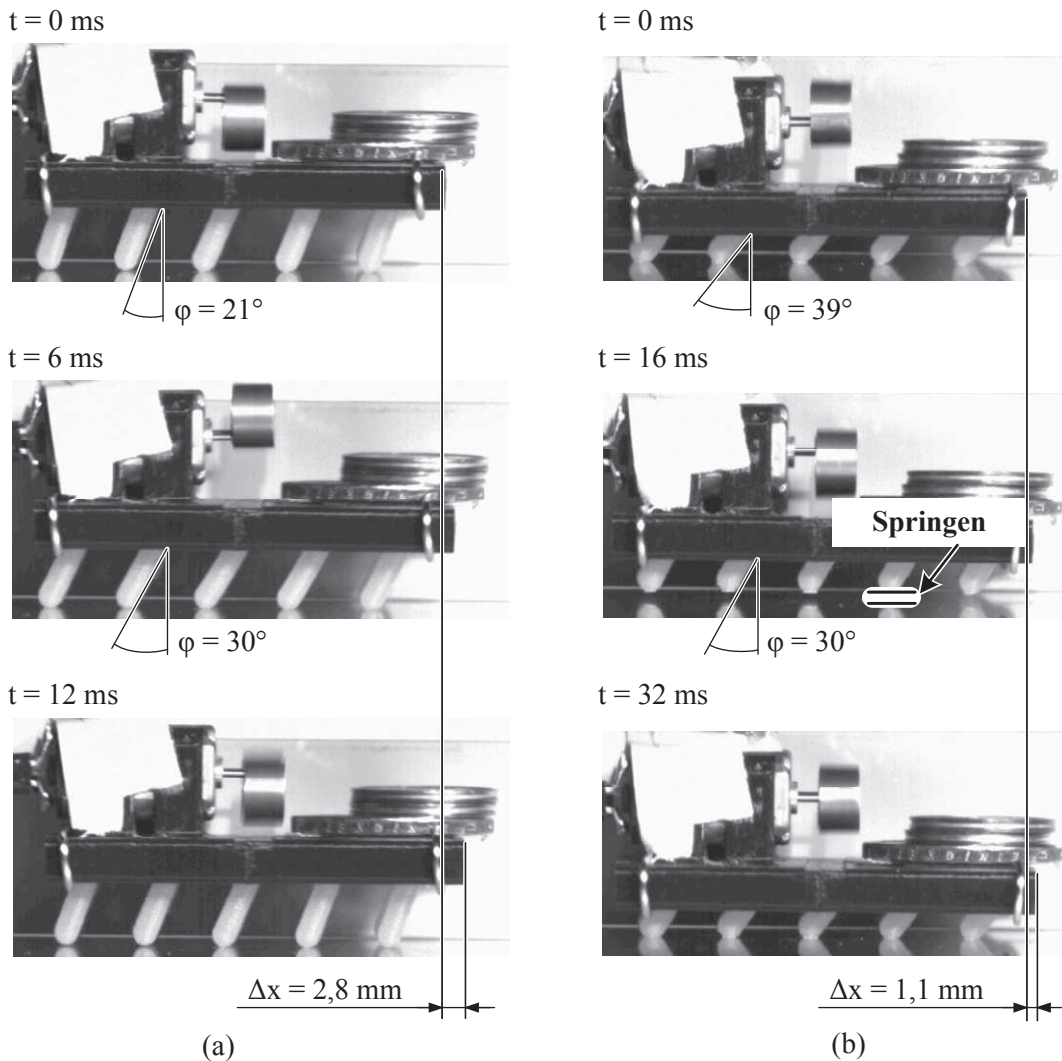
In Abb. 4.6 ist das Bewegungsverhalten des Experimentalsystems mit zwei unterschiedlichen Borstenmatten und verschiedenen Erregungsfrequenzen für eine volle Umdrehung der Motoren dargestellt. Es ist mit zusätzlichen Massen beschwert.

Die Überlagerung der Fliehkräfte beider Motoren führt zu einer Auf- und Abbewegung des Hauptkörpers und einer periodischen Biegung der elastischen Borsten, was durch die Größe  $\varphi$  verdeutlicht wird. Während der Senkbewegung des Hauptkörpers verformen sich die Borsten elastisch und speichern potentielle Energie. In dieser Phase der Bewegung nehmen Kontakt- und Reibungskräfte zwischen den Borstenendpunkten und dem Untergrund zu und begrenzen die Rückwärtsbewegung des Systems. Während der Aufbewegung des Hauptkörpers wird die gespeicherte Verformungsenergie in kinetische Energie umgewandelt und die Antriebskraft wirkt nach oben. Das Gleiten der Borstenendpunkte wird begünstigt, siehe Abb. 4.6 (a).

Wie in Abb. 4.6 (b) dargestellt, können bestimmte Parameterkombinationen zum Kontaktverlust des Experimentalsystems zum Untergrund führen. Das System bewegt sich vorwärts und vollführt periodische Sprünge. Nach einer Umdrehung der Motoren hat sich das Gesamtsystem um  $\Delta x$  in positive Richtung bewegt.

#### 4 Terrestrische Roboter mit Borsten für unidirektionale Lokomotion

Für einige Parameterkombinationen kann eine Verkippung des Hauptkörpers beobachtet werden. Das System bewegt sich teilweise nicht auf einer Geraden, sondern auf Bewegungsbahnen mit einer geringen Krümmung. Gründe hierfür sind der nicht vollständig symmetrische Aufbau, der zeitweise nicht synchrone Lauf der Motoren und die Resonanzeigenschaften der elastischen Borstenstrukturen.



**Abb. 4.6:** Einzelbilder von Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen der Bewegung des Experimentalsystems ( $m_0 = 48$  g) mit verschiedenen Borstenstrukturen und Erregungsfrequenzen: (a) - Borsten mit  $l = 10$  mm,  $\varphi_0 = 20^\circ$ , Erregung mit  $f = 85$  Hz - dauerhafter Kontakt zum Untergrund; (b) - Borsten mit  $l = 6$  mm,  $\varphi_0 = 30^\circ$ , Erregung mit  $f = 30$  Hz - periodisches Springen;  $\Delta x$  - Schrittweite des Systems nach einer vollen Umdrehung der Motoren; Kameramodell: HCC-1000; Hersteller: VDS Vosskühler GmbH, Deutschland; Aufnahmeparameter: (a) - 462 FPS; (b) - 231 FPS [Bec14]

#### 4.4.2 Parameterstudien zur Geschwindigkeit des Systems mit Borsten

Für die Parameterstudien werden die Motoren und die LED eingeschaltet. Die Geschwindigkeitsmessungen erfolgen durch die optische Auswertung des zurück gelegten Weges für die Messzeit von  $T = 2$  s. Als Messsystem wird eine senkrecht über dem Experimentalaufbau positionierte Fotokamera benutzt. Während jeder Messung wird eine digitale Fotografie mit der Belichtungszeit gleich der Messzeit erstellt. Auf den Aufnahmen zeichnet sich die Spur der LED ab und kann computergestützt vermessen werden. Die dokumentierten Werte entsprechen der Gesamtbogenlänge der Leuchtdiodenspur pro Belichtungszeit. Für jede Parameterkombination werden drei Messungen durchgeführt.

In den Diagrammen in Abb. 4.7 sind die Mittelwerte der Einzelmessungen dargestellt. Die Streuung der Messwerte wird durch einen Balken markiert, der zwischen den minimalen und maximalen gemessenen Größen aufgetragen wird. Er verdeutlicht nicht die vergleichsweise geringen Messfehler, sondern die Schwankung des Bewegungsverhaltens während der Messungen, durch die oben genannten Ursachen. Ist kein solcher Balken eingezeichnet, beträgt die Abweichung vom Mittelwert weniger als  $\pm 0,4$  cm/s. In mehr als 85 % der Fälle ist die Streuung vernachlässigbar.

Der Vergleich der experimentellen und numerischen Parameterstudien zeigt, trotz des hohen Abstraktionsgrades der Modellierung als Mehrkörpersystem mit masselosen Borsten, sehr gute qualitative Übereinstimmungen. Die Erhöhung der Erregungsfrequenz führt zu höheren Geschwindigkeiten. Nach einem starken Anstieg im Bereich von 30 Hz bis 50 Hz, flacht die Kurve für höhere Frequenzen ab. Die Trägheit der Borsten und des Hauptkörpers verhindert einen linearen Anstieg der Geschwindigkeit.

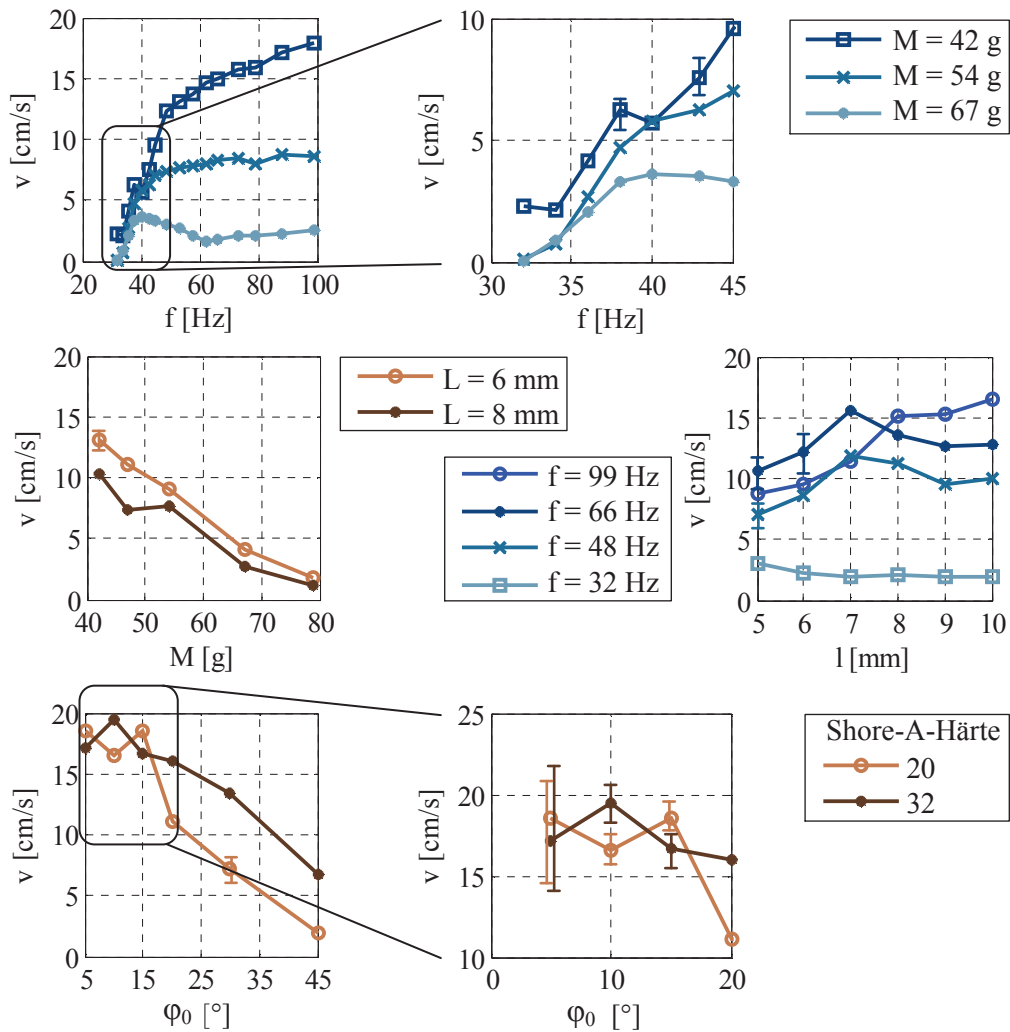
Schwerere Systeme sind prinzipiell langsamer als leichtere. Die Beziehung zwischen Hauptkörpermasse und Geschwindigkeit ist im Bereich von 40 g bis 80 g dargestellt. Bei höheren Massen kommt es zu keiner Fortbewegung. Niedrigere Massen konnten mit dem konstruktiven Aufbau des Experimentalsystems nicht realisiert werden. Im gemessenen Bereich bestätigen die Experimente die Simulationen.

Als Ergänzung zu den Simulationen wird der Einfluss der Borstenlänge von 5 mm bis 10 mm für vier verschiedene Erregungsfrequenzen ermittelt. Es zeigt sich, dass der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Beinlänge nicht linear ist.

Wie durch die Simulationen vorhergesagt, führen geringe Neigungswinkel der Borsten zu hohen Geschwindigkeiten. Experimentell wird für verschiedene Shore-A-Härten der Borsten das Geschwindigkeitsmaximum im Bereich von  $5^\circ$  bis  $15^\circ$  erreicht, wobei die Systeme mit Borsten höherer Shore-A-Härte im Allgemeinen schneller sind. Die Messwerte für kleine Winkel zeigen eine breite Streuung. Die steilen Borsten führen zu einem unruhigen, teilweise instabilen Systemverhalten.



#### 4 Terrestrische Roboter mit Borsten für unidirektionale Lokomotion



**Abb. 4.7:** Experimentell ermittelte Abhängigkeit der Geschwindigkeit von Erregungsfrequenz und Systemparametern



## 4.5 Zusammenfassung vibrationsgetriebener Roboter mit Borsten

Borsten können in mobilen Robotern genutzt werden, um eine innere periodische Erregung in eine gerichtete Fortbewegung zu wandeln. Sie sind eine Realisierung von „intelligenter Mechanik“. Das entwickelte mechanische Modell ermöglicht den Vergleich der verschiedenen Wirkmechanismen von Borsten.

### Systeme nach Modell I

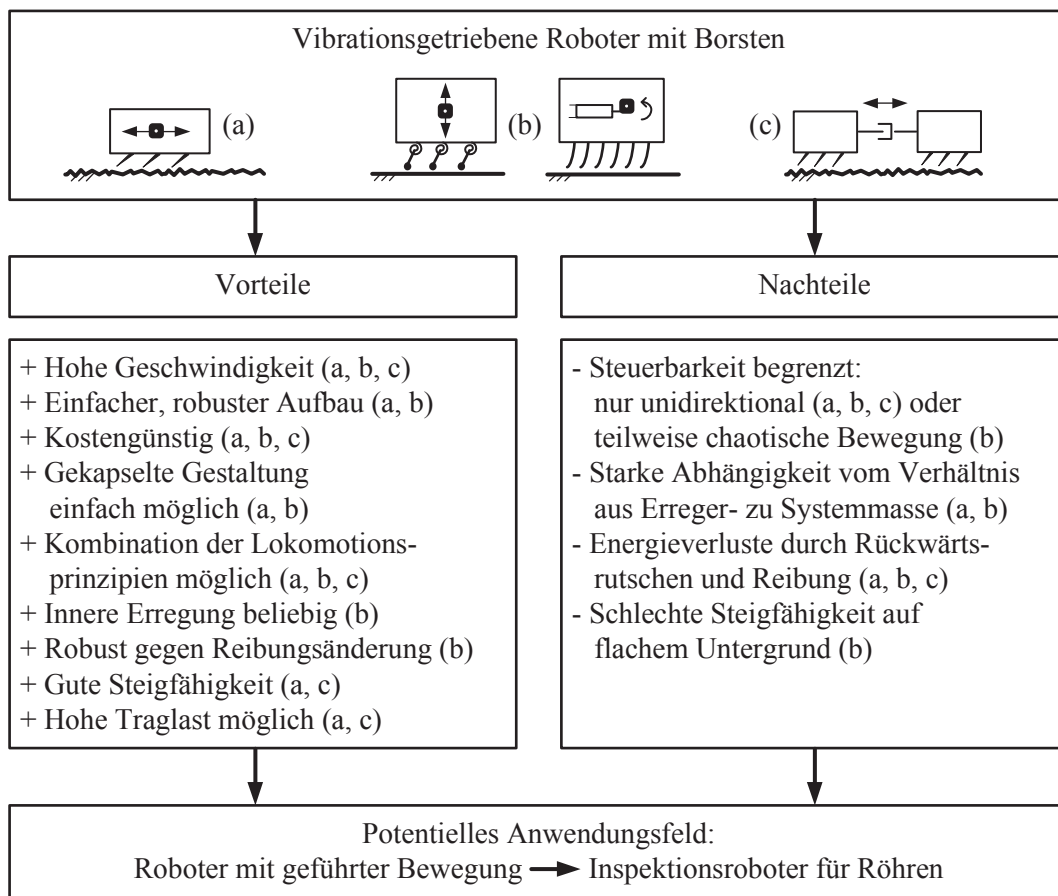
Lokomotionssysteme mit kurzen, steifen Borsten benötigen einen hinreichend rauen Untergrund. Zur Modellierung dienen anisotrope Reibungskoeffizienten. Die Antriebskraft muss in Bewegungsrichtung erzeugt werden. Die Geschwindigkeit der Systeme wird durch die innere Erregung und Reibungseigenschaften bestimmt.

### Systeme nach Modell II / Experimentalsystem

Für die analytische Betrachtung der Lokomotion von Systemen mit langen, elastischen Borsten ist die Modellierung ihrer elastischen Eigenschaften notwendig. Abhängig von der Paarung aus Untergrund und Borsten, kann der Reibungsbeiwert isotrop oder anisotrop modelliert werden. Die Gestaltung der Borsten für eine Maximierung der Geschwindigkeit ist ein Optimierungsproblem der Borsten- ( $l, c, \varphi$ ) und Erregungsparameter ( $m_1, m_2, A, f$ ) unter Berücksichtigung der Umgebungseigenschaften ( $\mu$ ) und der Gesamtsystemmasse ( $m_R$ ). Doch auch wenn die Parameter weit vom Optimum für hohe Geschwindigkeiten entfernt sind oder der Reibungskoeffizient in positive Richtung deutlich größer als in negative Richtung ist, wird sich, bei geeigneter Ansteuerung, ein solches System vorwärts bewegen.

### Vor- und Nachteile

In Abb. 4.8 werden Vor- und Nachteile verschiedener Roboter mit Borsten zusammengefasst. Roboter, die aus nur einem Segment bestehen (a, b), besitzen ein großes Potential als Inspektionssysteme für Röhren. Sie sind klein, einfach, preiswert, schnell und können gekapselt realisiert werden. Das Problem der Steuerbarkeit ist für einen Einsatz in verzweigungsfreien Röhren nicht von Bedeutung. Die für eine gute Steigfähigkeit benötigten Normalkräfte können in Röhren bezüglich der Wandung erzeugt werden. Die Bewegung in negative Richtung wird, soweit es die Haftreibung zwischen Borsten und Wandung zulässt, blockiert, vergleichbar mit der Funktionsweise eines selbstsperrenden Getriebes. Die Anpassungsfähigkeit langer Borsten ermöglicht ein breites Einsatzspektrum, z. B. für Roboter, die sich in Röhren mit veränderlichem Durchmesser und Beschädigungen fortbewegen.



**Abb. 4.8:** Vor- und Nachteile vibrationsgetriebener Roboter mit Borsten

## 4.6 Prototyp für die Fortbewegung in Röhren

Die im vorliegenden Kapitel gewonnen Erkenntnisse zur Lokomotion von Systemen mit elastischen Borsten werden zur Entwicklung eines Prototyps für die Fortbewegung in verzweigungsfreien Röhren verwendet. Er ist in Abb. 4.9 dargestellt. Parameter sind in Tab. 4.3 gegeben.

Der Roboter besteht aus einem Borstenkörper aus Schaumstoff, einem Gleichstrommotor mit Unwucht und der Energieversorgung aus sechs Knopfzellen. Er ist für die Lokomotion in Röhren mit einem Innendurchmesser von 25 mm und einem minimalen Krümmungsradius von 30 cm ausgelegt.

Im unbelasteten Zustand hat der Roboter einen Durchmesser von 26 mm und der Borstenwinkel beträgt  $30^\circ$ . Die Borsten sind gleichmäßig auf der Oberfläche des zylindrischen Grundkörpers verteilt. Ihr Durchmesser variiert von 2 mm, nahe des Grundkörpers, bis zu 4 mm am freien Ende, sodass die größte Biegedeformation dieser elastischen Elemente nahe am Grundkörper auftritt.

Der Gleichstrommotor rotiert die Unwuchtmasse  $m_e = 0,9$  g mit einer Drehzahl  $N \approx 5000$  U/min. Der Prototyp kann eine Geschwindigkeit von bis zu 12 mm/s in einer geraden Glasröhre erreichen. Experimente zur Prüfung der Steigfähigkeiten des Roboters zeigen, dass eine Steigung von mehr als 50 % überwunden werden kann. Diese Fähigkeit kann durch die nicht symmetrischen Reibungsverhältnisse erklärt werden. Bei der verwendeten Materialpaarung aus Schaumstoff und Glas kann kein ausgeprägter anisotroper Reibungskoeffizient ermittelt werden, es zeigt sich aber, dass durch die Steigung der Borsten die Rückwärtsbewegung des Systems in der Röhre blockiert wird. Diese Eigenschaft und die Möglichkeit, den Roboter vollständig gekapselt zu gestalten, verdeutlichen das Potential solcher Systeme für den Einsatz in fluidgefüllten Röhren. Die Elastizität der Borsten und das Lokomotionsprinzip begünstigen die Verwendung in Röhren mit kleineren Beschädigungen oder Verunreinigungen.

Die Reibungskraft zwischen Roboter und der verwendeten Glasröhre hat eine Größe von 63 mN in und 108 mN entgegen der Bewegungsrichtung. Es kann eine Vortriebskraft  $F_A - F_W$  von 46 mN erzeugt werden. Für die Kraftmessungen wird das in Anhang A.2 beschriebene System benutzt. In Tab. 4.4 sind die maximalen Steigungsgeschwindigkeiten des Roboters in einer 25 mm-Glasröhren gelistet.



**Abb. 4.9:** Prototyp eines vibrationsbasierten Roboters mit Borsten für die unidirektionale Lokomotion in Röhren mit  $D = 25$  mm [Bec13a]

**Tab. 4.3:** Parameter des Prototyps für Röhren

Länge	$L$	58	mm
Durchmesser	$D$	26	mm
Borstenlänge	$l$	8	mm
Borstendurchmesser	$d$	2...4	mm
Borstenwinkel	$\varphi$	30	°
Masse	$m_R$	6,5	g
Erregungsfrequenz	$f$	80	Hz

**Tab. 4.4:** Geschwindigkeit des Prototyps in einer Glasröhre in Abhängigkeit des Steigungswinkels

Steigungswinkel [°]	0	5	10	15	20	25
Geschwindigkeit [mm/s]	12	10	8	4	3	2

# 5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb

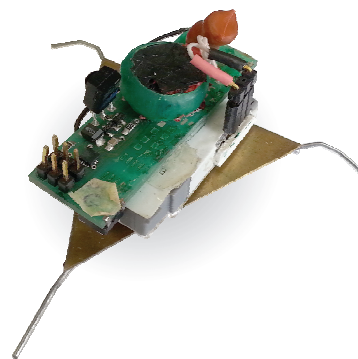
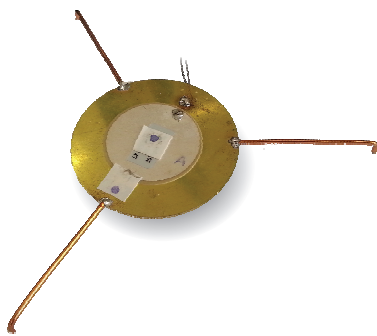
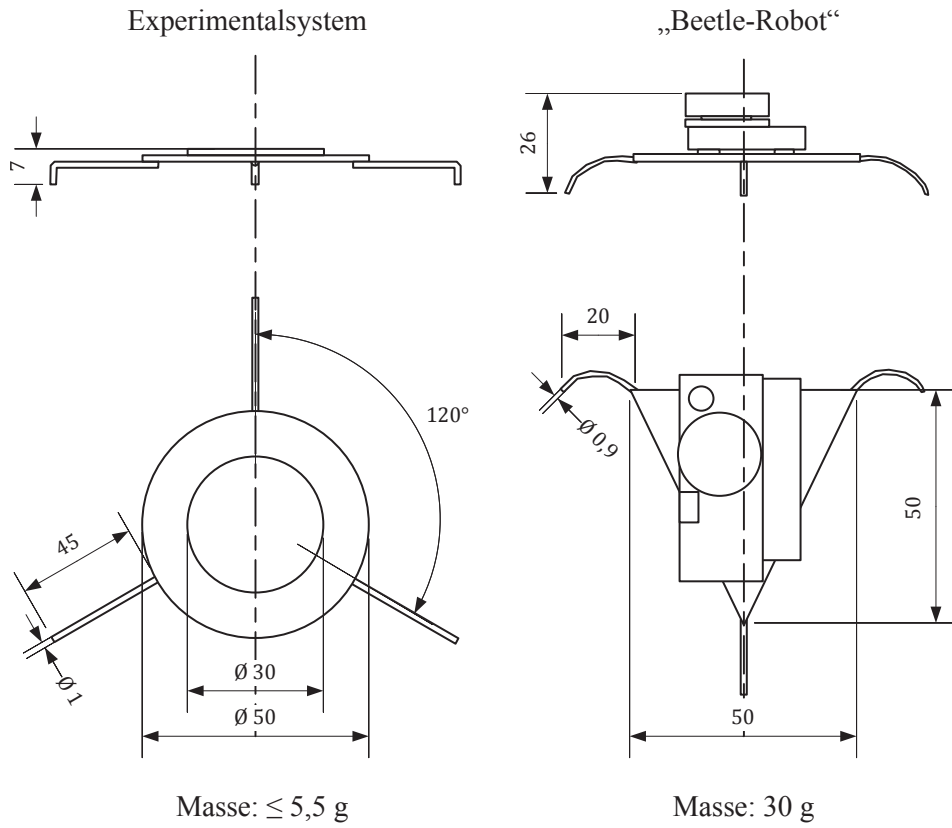
Terrestrische Roboter mit hochfrequenten Antrieben wurden im Stand der Technik besprochen. Die Abschnitte 2.5 und 3.2 verdeutlichen die besondere Eignung piezoelektrischer Biegeaktoren für diese Aufgabe. Die Bewegungssysteme auf Basis resonanter Kontinuumschwingungen aus Abschnitt 3.2 erzeugen ihre Lokomotion, vergleichbar zu piezoelektrischen Stehwellenmotoren [Uch98], durch hochfrequente Reibstöße [Glo95], d. h. durch periodischen Kontaktverlust eines Wirkelements und trockener Reibung zur Übertragung der Antriebskraft. Für die Erzeugung einer steuerbaren Bewegung ist eine abgestimmte Ansteuerung mehrerer Aktoren notwendig. Eine Sonderstellung nimmt der „Minch-Robot“ [Aba07] ein, siehe Abb. 3.8, der sich zweidimensional, mit nur einem Antriebselement fortbewegen kann.

Dieses Konzept bildet den Ausgangspunkt des vorliegenden Kapitels. Es wird die terrestrische Lokomotion von Robotern mit einem einzigen hochfrequenten Antrieb untersucht. Einleitend wird ein „klassisches Starrkörpersystem,“ mit einem periodischen Antrieb in der Koppelstelle der Elemente, mittels eines Massenpunktmodells studiert. Es kann sich unidirektional bewegen und verdeutlicht die Grenzen von starren Konstruktionen. Für eine zweidimensionale Lokomotion wären mehrere Antriebe notwendig. Die Anwendung des Prinzips „intelligence by mechanics“ [Bli07] ermöglicht die Konstruktion von steuerbaren Systemen für die zweidimensionale Lokomotion mit nur einem Aktor. Genutzt wird das frequenzabhängige Schwingungsverhalten elastischer Strukturen. Resonanz spielt eine wichtige Rolle. Dieser Ansatz wird in den weiteren Betrachtungen verfolgt.

Zwei Systeme, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden, sind in Abb. 5.1 dargestellt. Ihre Lokomotionseinheiten bestehen aus piezoelektrischen Biegeaktoren und elastischen Drähten, die als Übertragungs- und Wirkelemente dienen. Sie werden als Beine bezeichnet. Die Untersuchungen erfolgen schrittweise von den Betrachtungen der Antriebs- und Übertragungselemente hin zu Gesamtsystemmodellen und Prototypen. Ziel ist es, die Einflussfaktoren auf das Schwingungs- und Bewegungsverhalten der Roboter zu untersuchen und die Steuerbarkeit solcher Systeme nachzuweisen.

Der programmier- und fernsteuerbare Prototyp „Beetle-Robot“ wurde basierend auf den Betrachtungen entwickelt und demonstriert die Anwendbarkeit des Lokomotionsprinzips in der mobilen Robotik.

5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb



**Abb. 5.1:** Roboter mit hochfrequentem Antrieb: Beispielhafte Lokomotionseinheit aus Antrieb und Übertragungselementen und programmier- und fernsteuerbarer Prototyp „Beetle-Robot“

## 5.1 Modellbasierte Untersuchung eines Starrkörpersystems mit einem periodischen Antrieb

Es wird ein Massenpunktmodell analytisch hergeleitet, das den Effekt der Lokomotionserzeugung durch einen inneren periodischen Antrieb und nicht symmetrische Systemeigenschaften verdeutlicht. Es ist ein „klassisches Starrkörpersystem,“ mit dem Antrieb in der Koppelstelle der gelenkig verbundenen Segmente. Der Ausgangspunkt der Arbeit wird unterstrichen.

### 5.1.1 Modellierung als Massenpunktmodell mit kinematischer Steuerung

Das Modell, das in Abb. 5.2 dargestellt ist, besteht aus vier Massenpunkten  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$ . Es ist symmetrisch zur  $x$ -Achse des raumfesten kartesischen Koordinatensystems  $(x, y, z)$  aufgebaut. Drei Punkte mit der Masse  $m_1$  besitzen dauerhaften Kontakt zum Untergrund, wobei isotrope Coulombsche Reibung  $F_{R1}$ ,  $F_{R2}$  und  $F_{R3}$  nach (2.17) ohne Haftung wirke. Die Punkte  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  sind mit  $P_0$  über masselose Stäbe der Länge  $L$  verbunden. Die Stäbe  $\overline{P_0P_2}$  und  $\overline{P_0P_3}$  sind fest miteinander verbunden und schließen den konstanten Winkel  $2\gamma$  ein. Im Punkt  $P_0$  liegt ein Drehgelenk, das die Stabanordnung  $(\overline{P_0P_2}, \overline{P_0P_3})$  und den Stab  $\overline{P_0P_1}$  verbindet. Die Stäbe  $\overline{P_0P_1}$ ,  $\overline{P_0P_2}$  und  $\overline{P_0P_3}$  schließen jeweils den Winkel  $\varphi(t)$  mit einer Normalen des Untergrundes ein.

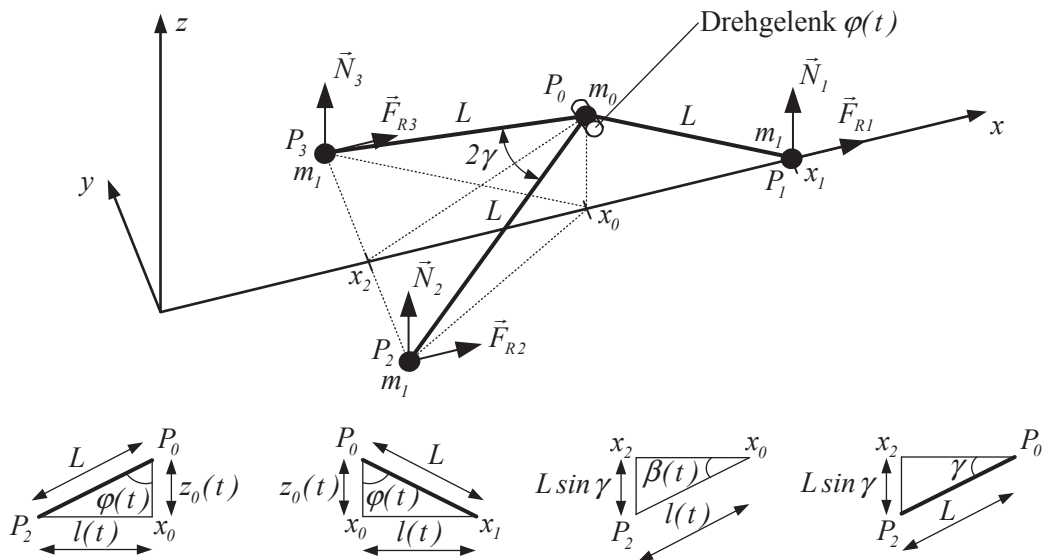


Abb. 5.2: Massenpunktmodell mit kinematischer Steuerung  $\varphi(t)$

## 5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb

In Abb. 5.2 werden die Winkelbeziehungen verdeutlicht. Die innere Erregung des Modells wird durch die kinematische Bedingung  $\varphi(t)$  gegeben. Sie führt durch

$$l(t) = L \sin \varphi(t) \quad (5.1)$$

zu einer periodischen Bewegung der Kontaktpunkte. Zur Herleitung der Bewegungsgleichung wird der Schwerpunktsatz in  $x$ -Richtung angewendet:

$$m_R \ddot{x}_S = F_{R1} + F_{R2} + F_{R3} = F_{R1} + 2F_{R2}, \quad (5.2)$$

mit

$$m_R = m_0 + 3m_1. \quad (5.3)$$

Durch Einsetzen des Reibungsmodells, siehe (2.17), mit dem Gleitreibungskoeffizienten  $\mu$  ergibt sich

$$m_R \ddot{x}_S = -\mu |N_1| \text{sign}(\dot{x}_1) - 2\mu |N_2| \text{sign}(\dot{x}_2). \quad (5.4)$$

Die noch unbekanntenen Geschwindigkeiten der Kontaktpunkte  $\dot{x}_1$ ,  $\dot{x}_2$  und die Normalkräfte  $N_1$ ,  $N_2$  werden im Folgenden hergeleitet.

Die  $x$ -Koordinate des Schwerpunkts  $x_S$  ergibt sich aus

$$x_S = \frac{\sum_{i=1}^4 x_i m_i}{\sum_{i=1}^4 m_i} = \frac{m_0 x_0 + m_1 x_1 + 2m_1 x_2}{m_0 + 3m_1}, \quad (5.5)$$

wobei

$$x_1 = x_0 + l, \quad x_2 = x_0 - l \cos \beta. \quad (5.6)$$

Aus der Ableitung von (5.5) nach der Zeit folgt

$$m_R \dot{x}_S = m_0 \dot{x}_0 + m_1 \dot{x}_1 + 2m_1 \dot{x}_2 \quad (5.7)$$

und mit

$$\dot{x}_0 = \dot{x}_1 - \dot{l}, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_0 - \dot{l} \cos \beta + l \dot{\beta} \sin \beta \quad (5.8)$$

lässt sich (5.7) als

$$m_R \dot{x}_S = m_R \dot{x}_1 - (m_0 + 2m_1 + 2m_1 \cos \beta) \dot{l} + 2m_1 l \dot{\beta} \sin \beta \quad (5.9)$$

schreiben. Wie in Abb. 5.2 zu erkennen gilt die geometrische Beziehung

$$l(t) \sin \beta(t) = L \sin \gamma = \text{konst.} \quad (5.10)$$

Mit  $\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta}$ ,  $0 < \beta < \frac{\pi}{2}$  folgt

$$\cos \beta = \frac{1}{l} \sqrt{l^2 - L^2 \sin^2 \gamma}. \quad (5.11)$$

Durch die zeitliche Ableitung von (5.10) und Einsetzen von (5.11) kann  $\dot{\beta}$  bestimmt werden.

$$\dot{\beta} = -\frac{L \sin \gamma}{l \sqrt{l^2 - L^2 \sin^2 \gamma}} \cdot \dot{l} \quad (5.12)$$



## 5.1 Modellbasierte Untersuchung eines Starrkörpersystems

Aus (5.9) folgt

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_S + \frac{1}{m_R} (m_0 + 2m_1 + 2m_1 \cos \beta) \dot{l} - \frac{2m_1}{m_R} l \dot{\beta} \sin \beta \quad (5.13)$$

und durch Einsetzen von (5.10), (5.11) und (5.12) wird die Geschwindigkeit des Punktes  $P_1$  erhalten:

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_S + \frac{1}{m_R} \left( m_0 + 2m_1 + 2m_1 \frac{1}{l} \sqrt{l^2 - L^2 \sin^2 \gamma} + 2m_1 \frac{L^2 \sin^2 \gamma}{l \sqrt{l^2 - L^2 \sin^2 \gamma}} \right) \dot{l}. \quad (5.14)$$

Aus (5.14) und (5.8) ergibt sich die Geschwindigkeit der Punkte  $P_2$  und  $P_3$ :

$$\dot{x}_2 = \dot{x}_S + \frac{1}{m_R} \left( -m_1 - (m_0 + m_1) \frac{1}{l} \sqrt{l^2 - L^2 \sin^2 \gamma} - (m_0 + m_1) \frac{L^2 \sin^2 \gamma}{l \sqrt{l^2 - L^2 \sin^2 \gamma}} \right) \dot{l}. \quad (5.15)$$

Die  $z$ -Koordinate des Massenpunktes  $P_0$ , Geschwindigkeit und Beschleunigung sind durch

$$z_0 = L \cos \varphi, \quad \dot{z}_0 = -L \dot{\varphi} \sin \varphi, \quad \ddot{z}_0 = -L \ddot{\varphi} \sin \varphi - L \dot{\varphi}^2 \cos \varphi. \quad (5.16)$$

gegeben. Aus (5.1) folgt für  $\varphi$  und die Ableitungen

$$\varphi = \arcsin \left( \frac{l}{L} \right), \quad \dot{\varphi} = \frac{\dot{l}}{\sqrt{L^2 - l^2}}, \quad \ddot{\varphi} = \frac{(L^2 - l^2) \ddot{l} + l \dot{l}^2}{(L^2 - l^2)^{3/2}}. \quad (5.17)$$

Durch Einsetzen von (5.1) und (5.17) in (5.16) ergibt sich

$$\ddot{z}_0 = -L \frac{(L^2 - l^2) \ddot{l} + l \dot{l}^2}{(L^2 - l^2)^{3/2}} \cdot \frac{l}{L} - L \frac{\dot{l}^2}{L^2 - l^2} \sqrt{1 - \frac{l^2}{L^2}} \quad (5.18)$$

woraus folgt

$$\ddot{z}_0 = -\frac{l(L^2 - l^2) \ddot{l} + L^2 \dot{l}^2}{(L^2 - l^2)^{3/2}}. \quad (5.19)$$

Durch die Anwendung des Schwerpunktsatzes in  $z$ -Richtung ergibt sich

$$m_0 \ddot{z}_0 = -m_0 g - 3m_1 g + N_1 + N_2 + N_3. \quad (5.20)$$

$N_1$ ,  $N_2$  und  $N_3$  sind die Reaktionskräfte in  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$ , wobei  $N_3 = N_2$ . Aus dem Momentengleichgewicht  $\sum M_y = 0$  im Punkt  $P_0$  folgt

$$0 = m_1 g l - N_1 l - 2m_1 g l \cos \beta + 2N_2 l \cos \beta. \quad (5.21)$$

Aus (5.20) und (5.21) ergeben sich die Normalkräfte zu

$$N_1 = m_1 g + \frac{m_0 (\ddot{z}_0 + g) \cos \beta}{1 + \cos \beta}, \quad N_2 = m_1 g + \frac{m_0 (\ddot{z}_0 + g)}{2(1 + \cos \beta)}. \quad (5.22)$$

### 5.1.2 Simulation des Massenpunktmodells

Zur Simulation des Bewegungsverhaltens des Modells wird die Bewegungsgleichung (5.4), unter Verwendung von (5.14), (5.15) und (5.22), mit dem Programmpaket *Matlab*<sup>®</sup>2012b / *Simulink*<sup>®</sup>8.0 numerisch integriert. Es werden die in Tab. 5.1 genannten Parameter verwendet. Sie orientieren sich an den Dimensionen der in Abschnitt 5.4 besprochenen Systeme.

**Tab. 5.1:** Parameter für die Simulation

<i>Strukturelle Parameter</i>			
Massen	$m_0 = m_1$	0,5	g
Länge	$L$	32	mm
Winkel (Ruhelage)	$\varphi_0$	80	°
Winkel $\angle(P_0P_2, P_0P_3)$	$\gamma$	0..55	°
Gleitreibungskoeffizient	$\mu$	0,2	
<i>Kinematische Steuerung</i>			
Erregungsfunktion	$\varphi(t)$	$\varphi_0 + \varphi_w \sin(\Omega t)$	°
Erregungsamplitude	$\varphi_w$	0,5	°
Erregungsfrequenz	$f$	0..40	Hz

Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abb. 5.3 und Abb. 5.4 beispielhaft dargestellt. Abb. 5.4 zeigt die Verläufe der Schwerpunktkoordinate  $x_S$  und der Koordinaten der Kontaktpunkte des Systems zum Untergrund  $x_1$  und  $x_2$ . Die Erregung  $\varphi(t)$  führt zu einer periodischen Bewegung der drei Kontaktpunkte. Durch den nicht symmetrischen geometrischen Aufbau des Systems

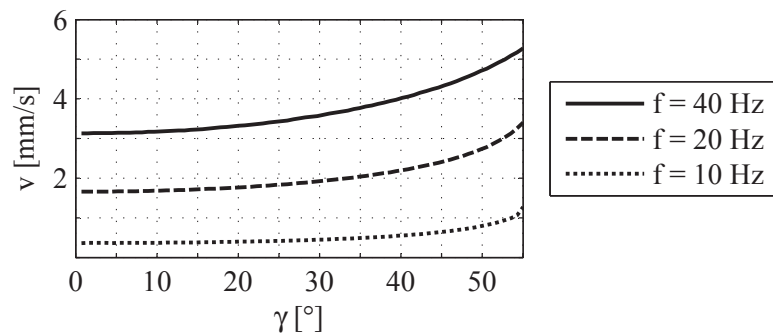
$$\begin{aligned}
 |x_1 - x_0| &= l = L \sin \varphi, \\
 |x_2 - x_0| &= l \cos \beta = L \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \gamma}, \quad 0 < \gamma < \varphi < \frac{\pi}{2}
 \end{aligned}
 \tag{5.23}$$

und die Massenverteilung entlang der  $x$ -Achse schwingt  $x_1$  mit einer größeren Amplitude als  $x_2$ . Wie in Abb. 5.4 dargestellt, führt die Erregung zu einem harmonischen Verlauf der Normalkräfte, wobei die maximale Amplitude von  $N_1$  kleiner ist als die von  $N_2$  und  $N_3$ . Diese Amplitudenunterschiede spiegeln sich im Verlauf der Reibungskräfte wider, was in einer Bewegung des Systemschwerpunktes in negative  $x$ -Richtung resultiert.

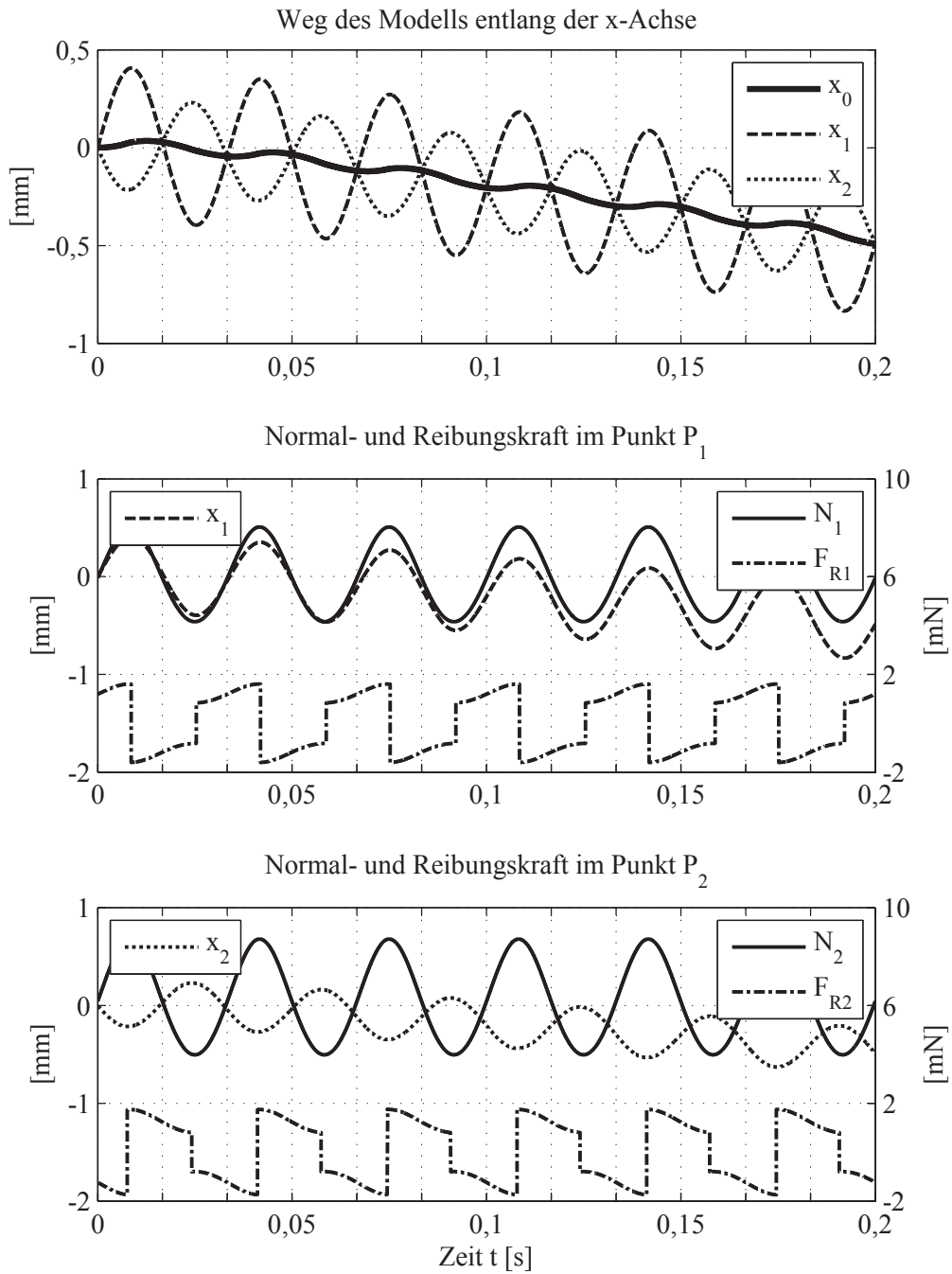
Abb. 5.3 zeigt den Betrag der Schwerpunktggeschwindigkeiten  $\dot{x}_S = v$  in Abhängigkeit der Erregungsfrequenz  $f$  und dem Winkel  $\gamma$ . Da dauerhafter Kontakt modelliert wurde, muss  $N \geq 0$  gelten, was die Erregungsfrequenz auf maximal 40 Hz begrenzt. In der Abbildung wird ersichtlich, dass die Geschwindigkeit mit der Frequenz steigt, bedingt durch die kinematische Erregung mit konstanter Amplitude. Für große Winkel  $\gamma$  wird  $v$  maximal, da sich der Schwerpunkt des Systems weiter aus dem geometrischen Mittelpunkt verschiebt und die Unsymmetrie damit verstärkt.

## 5.1 Modellbasierte Untersuchung eines Starrkörpersystems

Die simulierten Geschwindigkeiten sind deutlich kleiner, als die in Abschnitt 5.4 an experimentellen Systemen gemessenen. Der hohe Abstraktionsgrad des Modells lässt von vornherein keine quantitative Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Messwerten der realen Systeme erwarten. Qualitativ kann jedoch das in Abschnitt 2.2 besprochene Lokomotionsprinzip, basierend auf inneren Schwingungen und nicht symmetrischen Systemeigenschaften, verdeutlicht werden. Die Überlagerung von „schnellen“ Antriebsschwingungen und der „langsamen“ Ortsveränderung ist im Verlauf von  $x_S$  nachvollziehbar. Das Modell ist damit exemplarisch für alle in dieser Arbeit besprochenen Roboter, die letztlich dieses Prinzip realisieren.



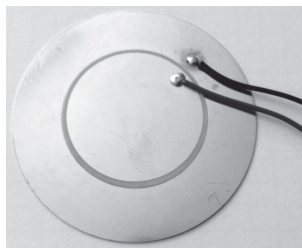
**Abb. 5.3:** Betrag der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von Winkel  $\gamma$  und Erregungsfrequenz  $f$



**Abb. 5.4:** Bewegungsverlauf sowie Normal- und Reibungskräfte des Massenpunktmodells für  $\gamma = 30^\circ$  und  $f = 30$  Hz

## 5.2 Statische und dynamische Untersuchung des Antriebselements

Die Antriebselemente der hier besprochenen Roboter sind kreisrunde piezoelektrische Biegeaktoren, siehe Abb. 5.5, wie sie als Klangerzeuger oder als Aktoren in miniaturisierten Pumpen Verwendung finden. Sie bestehen aus einer metallischen Trägerscheibe, z. B. Federbronze oder Messing, und einer Scheibe aus piezoelektrischer Keramik, die miteinander verklebt sind. Die Metallscheibe besitzt zur Vergrößerung der Auslenkung einen höheren Durchmesser als die Piezoscheibe:  $D_M > D_P$ . Die Indizes „M“ und „P“ kennzeichnen den metallischen Träger und die piezoelektrische Keramik. Als elektrische Kontakte dienen die Trägerscheibe und eine Elektrodenschicht auf der Keramik.



**Abb. 5.5:** Piezoelektrischer Biegeaktor für die experimentellen Untersuchungen: Außendurchmesser  $D_M = 50$  mm, Innendurchmesser  $D_P = 30$  mm

Ziel der Betrachtungen ist die Ermittlung statischer und dynamischer Eigenschaften, wie Auslenkung, Eigenfrequenzen und Eigenformen. In der Anwendung als Antriebselement der genannten Roboter ist der Aktor Teil eines elastischen Systems, das durch Anlegen einer elektrischen Wechselspannung in einem Frequenzband von 100 Hz bis 100 kHz periodisch erregt wird. Die wechselseitigen Beeinflussungen zwischen Ansteuerung und den Teilkomponenten des Roboters sollen besprochen werden.

Analytische Ergebnisse dienen als Vergleichsgrößen für die FE-Simulationen, deren Aussagekraft durch Experimente geprüft wird. Für die FE-Berechnungen wird das Programmpaket *ANSYS Mechanical APDL*<sup>TM</sup> 14.5 benutzt. Verwendet werden *SOLID5*- und *SOLID185*-Elemente. Dämpfung wird vernachlässigt.

Für die Berechnungen werden die in Tab. 5.2 gegebenen Kennwerte verwendet. Die Parameter der Piezokeramik entsprechen denen von „Weich“-PZT-Keramiken, hier *PIC 151*<sup>1</sup>, wie sie für „Ultraschallwandler geringer Leistung und niederfrequente Schallwandler“ [PI 12] verwendet werden. Die Einflüsse von Klebefuge, Elektrodenfläche, Lötstellen und Kabeln werden in den Berechnungen vernachlässigt.

Die folgenden analytischen Betrachtungen erfolgen unter der Annahme, dass Piezo- und Trägermaterial die gleiche Querkontraktionszahl  $\nu$  haben. Es wird Rotationssymmetrie vorausgesetzt. Biegesteifigkeit und piezoelektrisches Biegemoment werden nach [Pfe82] bestimmt.

<sup>1</sup> Aktoren aus *PIC 151* werden durch die Firma PI Ceramic GmbH, Deutschland vertrieben.

**Tab. 5.2:** (Gewählte) Kennwerte des Piezoaktors für die numerischen Untersuchungen (vollständige Tabelle der Piezokennwerte siehe Anhang A.3)

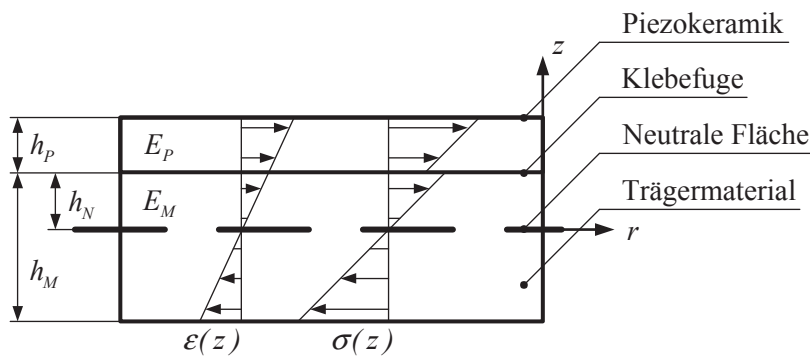
	Messing		Piezokeramik		
Radius	$R_M$	25	$R_P$	15	mm
Höhe	$h_M$	0,2	$h_P$	0,2	mm
E-Modul	$E_M$	100	$E_P$	59,4	GPa
Dichte	$\rho_M$	8500	$\rho_P$	7760	kg/m <sup>3</sup>
Querkontraktionszahl <sup>1</sup>	$\nu_M$	0,37	$\nu_P$	0,34	
Querkontraktionszahl <sup>2</sup>	$\nu = \frac{1}{2}(\nu_M + \nu_P) = 0,355$				
Piezomodul (Quereffekt)			$d_{31}$	$-2,14 \cdot 10^{-10}$	m/V

<sup>1</sup>Exakte Werte für Numerik (FEM)                      <sup>2</sup>Vereinfachung für Analytik

### 5.2.1 Biegesteifigkeit von Laminaten

Zur Berechnung der Biegesteifigkeit  $N$  werden die Aktoren als dünne elastische Platten modelliert, wobei zur Beschreibung die Plattentheorie nach Kirchhoff [Sza64] mit ihren bekannten Annahmen und Widersprüchen für Laminat angewendet wird, was auch als klassische Laminattheorie [Alt96], [Jon99] bezeichnet wird. Die Höhe der Klebefuge zwischen den Teilplatten wird vernachlässigt und die Klebung als ideal angenommen.

Für die Einführung von  $N$  und die Anwendung der Kirchhoffschen Plattentheorie wird eine neutrale Fläche benötigt. Die Lage dieser lässt sich aus der Bedingung der Kräftefreiheit in radialer Richtung  $r$  (5.25) bestimmen. Während in einer über die Höhe symmetrisch aufgebauten Platte die neutrale Fläche auf halber Höhe liegt, verschiebt sie sich für die Zweischichtanordnung. Wie in Abb. 5.6 dargestellt, lässt sich ihre Lage durch den Abstand  $h_N$  zur Klebfuge beschreiben. Es wird angenommen, dass die Platte mit den Höhen  $h_M$  und  $h_P$  durch ein über den Umfang gleichmäßig verteiltes Randmoment  $\tilde{m}_0$  beansprucht wird [Pfe82]. Die Annahme, dass die Dehnung  $\varepsilon$  linear über die Plattenhöhe ansteigt, ist konsistent mit der Kirchhoff-Hypothese der Laminattheorie [Jon99]. Der Sprung im Spannungsverlauf  $\sigma$  an der Verbindungsstelle zwischen den Teilplatten liegt in den unterschiedlichen Elastizitätsmodulen des Metalls  $E_M$  und der Piezokeramik  $E_P$  begründet.



**Abb. 5.6:** Darstellung des Verlaufs von Spannung  $\sigma$  und Dehnung  $\varepsilon$  in einem biegebeanspruchten Zweischichtlaminat

## 5.2 Statische und dynamische Untersuchung des Antriebslements

Für die Radialspannungen im rotationssymmetrischen Fall gilt

$$\sigma_{r,M} = \frac{E_M}{1-\nu^2} \left( w'' + \frac{\nu}{r} w' \right) z, \quad \sigma_{r,P} = \frac{E_P}{1-\nu^2} \left( w'' + \frac{\nu}{r} w' \right) z. \quad (5.24)$$

Die Durchbiegung der Platte ist  $w(r)$ . Die Bedingung für die Kräftefreiheit lautet

$$\int_z \sigma_r dz = 0. \quad (5.25)$$

Für die Piezo-Metall-Platte (PM-Platte) folgt

$$\frac{1}{1-\nu^2} \left( w'' + \frac{\nu}{r} w' \right) \left( E_M \int_{-(h_M-h_N)}^{h_N} z dz + E_P \int_{h_N}^{h_N+h_P} z dz \right) = 0, \quad (5.26)$$

woraus sich für den gesuchten Abstand

$$h_N = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_M h_M^2 - E_P h_P^2}{E_M h_M + E_P h_P} \quad (5.27)$$

ergibt. Mit Einführung der Verhältniswerte

$$e = \frac{E_P}{E_M} \quad \text{und} \quad a = \frac{h_P}{h_M} \quad (5.28)$$

kann für (5.27) geschrieben werden

$$h_N = \frac{h_M}{2} \cdot \frac{1 - ea^2}{1 + ea}. \quad (5.29)$$

Durch Betrachtung des inneren Biegemoments

$$\tilde{m}_R = \int_z z \sigma_r dz, \quad (5.30)$$

das zum äußeren angreifenden Moment  $\tilde{m}_0$  im Gleichgewicht steht, kann bei bekanntem Abstand  $h_N$  die Biegesteifigkeit  $N_{PM}$  berechnet werden. Das Moment ergibt sich unter Nutzung von (5.28) zu

$$\begin{aligned} \tilde{m}_{r,PM} &= \frac{-1}{1-\nu^2} \left( w'' + \frac{\nu}{r} w' \right) \left( E_M \int_{-(h_M-h_N)}^{h_N} z^2 dz + E_P \int_{h_N}^{h_N+h_P} z^2 dz \right) \\ &= \left( w'' + \frac{\nu}{r} w' \right) \frac{-E_M h_M^3}{3(1-\nu^2)} \left[ 3 \left( \frac{h_N}{h_M} \right)^2 (1+ea) - 3 \left( \frac{h_N}{h_M} \right) (1-ea^2) + (1+ea^3) \right]. \end{aligned} \quad (5.31)$$

## 5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb

Wird Beziehung (5.29) in Ausdruck (5.31) eingesetzt, folgt für die Biegesteifigkeit der Laminatplatte mit PM-Aufbau

$$N_{PM} = \frac{E_M h_M^3}{3(1-\nu^2)} \left[ 1 + ea^3 - \frac{3(1-ea^2)^2}{4(1+ea)} \right] \quad (5.32)$$

$$= \frac{E_M h_M^3}{12(1-\nu^2)} \frac{4(1+ea^3)(1+ea) - 3(1-ea^2)^2}{1+ea}$$

im Vergleich zu der Steifigkeit  $N_0$  ihrer Trägerplatte. Eine homogene Metallplatte mit  $h_M$  und  $E_M$  hat die Biegesteifigkeit

$$N_0 = \frac{E_M h_M^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (5.33)$$

Für den gegebenen Aktor folgt

$$N_0 = 0,0763 \text{ Nm}, \quad N_{PM} = 6,0668 \cdot N_0 = 0,4628 \text{ Nm}.$$

Der Abstand zwischen neutraler Fläche und Klebefuge beträgt

$$h_N = 0,2546 \cdot \frac{h_M}{2} = 0,0255 \text{ mm}.$$

### 5.2.2 Piezoelektrisches Biegemoment

Zur Beschreibung der elektro-mechanischen Eigenschaften von piezoelektrischen Materialien werden die linearen Feldgleichungen benutzt:

$$\vec{\epsilon} = \mathbf{s}^E \vec{\sigma} + \mathbf{d}^T \vec{E}_{el}, \quad (5.34)$$

$$\vec{D} = \mathbf{d} \vec{\sigma} + \mathbf{e}^\sigma \vec{E}_{el}. \quad (5.35)$$

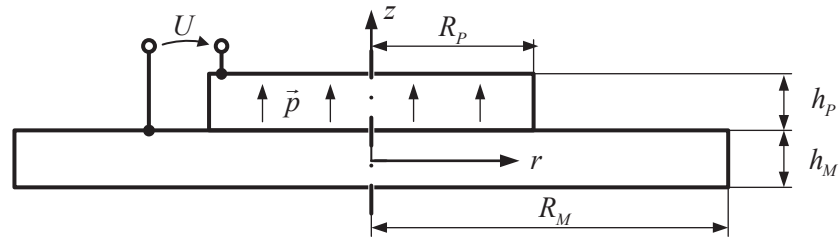
(5.34) ist die piezoelektrische Aktorgleichung und beschreibt die Gesamtdehnung  $\vec{\epsilon}$  des Materials als Superposition aus mechanisch und elektrisch induzierter Dehnung. Die mechanische Dehnung ergibt sich in Analogie zum Hookeschen Gesetz aus der mechanischen Spannung  $\vec{\sigma}$  und der Matrix der elastischen Nachgiebigkeit  $\mathbf{s}^E$  im konstanten elektrischen Feld. In piezoelektrischen Materialien bewirkt ein elektrisches Feld  $\vec{E}_{el}$  eine Dehnung über die transponierte Matrix des piezoelektrischen Moduls  $\mathbf{d}$ . Umgekehrt erzeugt eine mechanische oder elektrische Spannung eine Verschiebungsflussdichte  $\vec{D}$ , wie in (5.35) beschrieben, wobei  $\mathbf{e}^\sigma$  die dielektrische Leitfähigkeit des Materials bei konstanter mechanischer Spannung beschreibt. Dieser Effekt ist für Sensoranwendungen von Interesse.

Da im vorliegenden Fall Schubspannungen keinen entscheidenden Einfluss auf den Wirkungsmechanismus haben und die Wirkungsrichtung des elektrischen Feldes und der Verschiebungsflussdichte gleich der Polarisationsrichtung  $\vec{p}$  sind, lassen sich (5.34) und (5.35) auf vier skalare Gleichungen (5.36) reduzieren. Die Indizes  $r$ ,  $\varphi$  und  $z$  sind die Richtungen in einem Zylinderkoordinatensystem, siehe Abb. 5.7.

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= s_{11}^E \sigma_r + s_{12}^E \sigma_\varphi + s_{13}^E \sigma_z + d_{31} E_{z,el} \\ \epsilon_\varphi &= s_{12}^E \sigma_r + s_{11}^E \sigma_\varphi + s_{13}^E \sigma_z + d_{31} E_{z,el} \\ \epsilon_z &= s_{13}^E \sigma_r + s_{13}^E \sigma_\varphi + s_{33}^E \sigma_z + d_{33} E_{z,el} \\ D_z &= d_{31} \sigma_r + d_{31} \sigma_\varphi + d_{33} \sigma_z + e_{33}^\sigma E_{z,el} \end{aligned} \quad (5.36)$$



## 5.2 Statische und dynamische Untersuchung des Antriebselements



**Abb. 5.7:** Schnittdarstellung des kreisrunden piezoelektrischen Biegeaktors mit Polarisationsrichtung  $\vec{p}$  der Keramik in einer Ebene  $\varphi = \text{konst.}$

Die numerischen Indizes der Konstanten folgen der standardisierten Schreibweise nach DIN EN 50324-2. Für das vorliegende Problem gilt: (1  $\rightarrow$   $r$ ), (2  $\rightarrow$   $\varphi$ ) und (3  $\rightarrow$   $z$ ).  $d_{31}$  ist z. B. das piezoelektrische Modul in 1- oder  $r$ -Richtung bei Wirkung des elektrischen Feldes in 3- bzw.  $z$ -Richtung.

Für die Arbeitsweise der verwendeten Aktoren ist nur die Dehnung quer zum elektrischen Feld von Bedeutung.  $\varepsilon_z$  spielt für den Wirkungsmechanismus keine Rolle. Der durch  $D_z$  beschriebene Sensoreffekt wird nicht betrachtet. Da  $\frac{h_P}{R_P} \ll \frac{1}{5}$ , wird die Annahme

$$\sigma_z = 0 \quad (5.37)$$

gemacht und das Problem mit den Zusammenhängen des ebenen Spannungszustandes [Sza64] behandelt. Das Materialverhalten in der  $(r, \varphi)$ -Ebene wird als isotrop betrachtet, da

$$s_{12}^E \approx -\nu s_{11}^E, \quad (5.38)$$

siehe Tab. A.2. Der wirksame Elastizitätsmodul der Piezokeramik für den Quereffekt wird als

$$E_P = \frac{1}{s_{11}^E} \quad (5.39)$$

definiert. Damit folgt für die Piezoscheibe in Aktoranwendungen

$$\begin{aligned} \varepsilon_{r,P} &= \frac{1}{E_P} (\sigma_{r,P} - \nu \sigma_{\varphi,P}) + d_{31} E_{z,el}, \\ \varepsilon_{\varphi,P} &= \frac{1}{E_P} (\sigma_{\varphi,P} - \nu \sigma_{r,P}) + d_{31} E_{z,el}. \end{aligned} \quad (5.40)$$

Zur Bestimmung des durch den Aktor erzeugten Biegemomentes  $\tilde{m}_{el}$  werden Träger- und Piezoscheibe zunächst als nicht verklebt betrachtet [Pfe82]. Eine elektrische Spannung  $U$  erzeugt das Feld

$$E_{z,el} = \frac{U}{h_P}. \quad (5.41)$$

Die freie Dehnung der Scheibe ist

$$\varepsilon_{r,P} = d_{31} \frac{U}{h_P}. \quad (5.42)$$

## 5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb

Eine Verklebung der Scheiben würde bei Wirkung des elektrischen Feldes zu einem Zwangszustand führen. Es wird modelliert, dass sich an der Stelle  $r = R_P$  beide Scheiben um  $u_M$  verlängern würden, wobei  $u_M$  größer als null und kleiner als die maximale Verlängerung im unverklebten Zustand ist:

$$0 < u_M < \varepsilon_{r,P} R_P. \quad (5.43)$$

Hierzu wäre eine Zugspannung  $\sigma_{r,M}$  im Metall und eine Druckspannung  $\sigma_{r,P}$  im Piezo notwendig. Diese Spannungen werden bestimmt und aus ihnen das im realen Fall erzeugte Biegemoment  $\tilde{m}_{el}$  berechnet. Die Bedingung für die Längengleichheit ist

$$\sigma_{r,P} h_P + \sigma_{r,M} h_M = 0. \quad (5.44)$$

Da Rotationssymmetrie mit reiner Radialbelastung vorliegt, gilt

$$u_\varphi = 0. \quad (5.45)$$

Die Verschiebung  $u_r$  wird durch die Differentialgleichung

$$u_r'' + \frac{1}{r} u_r' - \frac{1}{r^2} u_r = 0 \quad (5.46)$$

beschrieben. Sie hat die allgemeine Lösung

$$u_r = C_1 r + \frac{C_2}{r}. \quad (5.47)$$

Die Randbedingungen des Problems lauten

$$\begin{aligned} u_{r,M}(r=0) &= 0, & u_{r,M}(r=R_P) &= u_M, \\ u_{r,P}(r=0) &= 0, & u_{r,P}(r=R_P) &= u_M - d_{31} \frac{U}{h_P}. \end{aligned} \quad (5.48)$$

$u_{r,P}(r=R_P)$  ist nach (5.40) die Superposition der freien (elektrischen) Dehnung und der durch mechanische Spannung verursachten Stauchung. Unter Verwendung der kinematischen Beziehungen

$$\varepsilon_r = u_r', \quad \varepsilon_\varphi = \frac{u_r}{r} \quad (5.49)$$

ergibt sich für die Dehnungen

$$\varepsilon_{r,M} = \varepsilon_{\varphi,M} = \frac{u_M}{R_P}, \quad \varepsilon_{r,P} = \varepsilon_{\varphi,P} = \frac{u_M}{R_P} - d_{31} \frac{U}{h_P}. \quad (5.50)$$

Mit dem Hookeschen Gesetz

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_r + \nu \varepsilon_\varphi), \quad \sigma_\varphi = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_\varphi + \nu \varepsilon_r). \quad (5.51)$$

folgt

$$\begin{aligned} \sigma_{r,M} &= \sigma_{\varphi,M} = \frac{E_M}{1-\nu} \frac{u_M}{R_P}, \\ \sigma_{r,P} &= \sigma_{\varphi,P} = \frac{E_P}{1-\nu} \left( \frac{u_M}{R_P} - d_{31} \frac{U}{h_P} \right). \end{aligned} \quad (5.52)$$

## 5.2 Statische und dynamische Untersuchung des Antriebslements

Durch Nutzung von (5.44) und des Elastizitätsmodul- und Höhenverhältnisses  $e$  und  $a$  (5.28) folgen für die Zug- und Druckspannung, die den Zwangszustand beschreiben

$$\begin{aligned}\sigma_{r,P} &= -d_{31} \frac{U}{h_P} \frac{E_P}{1-\nu} \frac{1}{1+ae}, \\ \sigma_{r,M} &= -a \sigma_{r,P} = d_{31} \frac{U}{h_P} \frac{E_M}{1-\nu} \frac{ae}{1+ae}.\end{aligned}\quad (5.53)$$

Durch die Integration dieser Spannungen über die Plattenhöhe, (5.30), wird das piezoelektrische Biegemoment  $\tilde{m}_{el}$  berechnet:

$$\begin{aligned}\tilde{m}_{el} &= \int_z \sigma_r z dz = \sigma_{r,M} \int_{-(h_M-h_N)}^{h_N} z dz + \sigma_{r,P} \int_{h_N}^{h_N+h_P} z dz \\ &= \frac{\sigma_{r,M}}{2} \left( 2h_N h_M - h_M^2 \right) + \frac{\sigma_{r,P}}{2} \left( 2h_N h_P + h_P^2 \right) \\ &= -d_{31} U \frac{E_P h_P}{1-\nu} \frac{1+a}{2a(1+ea^2)}.\end{aligned}\quad (5.54)$$

Die Integrationsgrenzen ergeben sich aus der Lage des Koordinatensystems in der neutralen Fläche, siehe Abb. 5.6. Im betrachteten Aktor ergibt sich bei einer elektrischen Spannung von  $U = 30$  V für das modellierte Moment

$$\tilde{m}_{el} = 0,0742 \frac{\text{Nm}}{\text{m}}.$$

### 5.2.3 Auslenkung des Aktors bei konstanter elektrischer Spannung

Zur Berechnung der Auslenkung des Aktors wird die Kirchhoffsche Plattengleichung verwendet:

$$\Delta \Delta w = \frac{p}{N}. \quad (5.55)$$

In Polarkoordinaten und bei Rotationssymmetrie gilt

$$\Delta \Delta w(r) = w'''' + \frac{2}{r} w''' - \frac{1}{r^2} w'' + \frac{1}{r^3} w'. \quad (5.56)$$

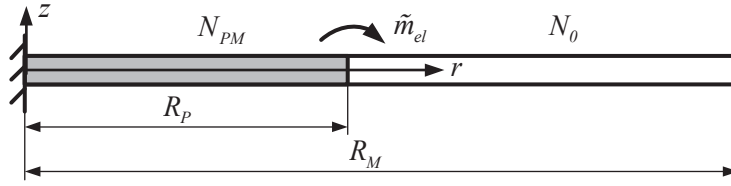
Mit  $w$  wird die gesuchte Biegeverformung in  $z$ -Richtung bezeichnet. In Abb. 5.8 ist die Problemskizze dargestellt. Eine mittig eingespannte Kreisplatte mit abschnittsweise unterschiedlicher Biegesteifigkeit  $N$  wird durch ein konstantes Biegemoment  $\tilde{m}_{el}$  (5.54) belastet. Ohne äußere Last  $p$  senkrecht zur Oberfläche ist (5.55) homogen und hat die Lösung

$$w(r) = C_1 + C_2 \ln r + C_3 r^2 + C_4 r^2 \ln r. \quad (5.57)$$

Zur Bestimmung der Durchbiegung wird das System in zwei Intervallen betrachtet:

$$\begin{aligned}0 \leq r \leq R_P &: \text{ Kreisplatte mit } N_{PM} \\ w_P(r) &= C_1 + C_2 \ln r + C_3 r^2 + C_4 r^2 \ln r; \\ R_P \leq r \leq R_M &: \text{ Kreisringplatte mit } N_0 \\ w_M(r) &= C_5 + C_6 \ln \frac{r}{R_M} + C_7 r^2 + C_8 r^2 \ln \frac{r}{R_M}.\end{aligned}\quad (5.58)$$

## 5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb



**Abb. 5.8:** Problemskizze zur Bestimmung der statischen Verformung des Aktors

Wie in Abb. 5.8 dargestellt, müssen  $w_P$  und  $w_M$  den folgenden Bedingungen genügen. Aus der Einspannung folgt

$$w_P(0) = 0, \quad w'_P(0) = 0. \quad (5.59)$$

Die geometrischen Übergangsbedingungen an der Stelle  $r = R_P$  lauten

$$w_P(R_P) = w_M(R_P), \quad (5.60)$$

$$w'_P(R_P) = w'_M(R_P). \quad (5.61)$$

Die dynamischen Übergangsbedingungen sind

$$\tilde{q}_{r,P}(R_P) = \tilde{q}_{r,M}(R_P), \quad (5.62)$$

$$\tilde{m}_{r,P}(R_P) = \tilde{m}_{r,M}(R_P) + \tilde{m}_{el}. \quad (5.63)$$

Am freien Rand gilt

$$\tilde{q}_{r,M}(R_M) = 0, \quad \tilde{m}_{r,M}(R_M) = 0. \quad (5.64)$$

Die Querkraft und das Schnittmoment können wie folgt dargestellt werden:

$$\tilde{q}_r(r) = -N \left( w''' + \frac{1}{r} w'' - \frac{1}{r^2} w' \right), \quad (5.65)$$

$$\tilde{m}_r(r) = -N \left( w'' + \frac{\nu}{r} w' \right). \quad (5.66)$$

Mit den Rand- und Übergangsbedingungen (5.59) bis (5.64) werden die gesuchten Konstanten in (5.58) bestimmt. Aus den geometrischen Randbedingungen (5.59) und

$$\lim_{r \rightarrow 0} r^2 \ln r = 0 \quad (5.67)$$

folgt

$$C_1 = C_2 = 0. \quad (5.68)$$

Für eine komprimierte Schreibweise werden, neben den bereits bekannten Verhältnissgrößen  $e = \frac{E_P}{E_M}$  und  $a = \frac{h_P}{h_M}$ , die folgenden Parameter eingeführt:

$$\eta = \frac{N_{PM}}{N_0}, \quad \chi = \frac{R_P}{R_M}, \quad \kappa = \frac{1 - \nu}{1 + \nu}. \quad (5.69)$$

## 5.2 Statische und dynamische Untersuchung des Antriebslements

Aus den dynamischen Randbedingungen (5.64) folgt

$$C_8 = 0, \quad C_7 = C_6 \frac{1}{2R_M^2} \frac{1-\nu}{1+\nu} = C_6 \frac{\kappa}{2R_M^2}. \quad (5.70)$$

Mit (5.62) ergibt sich

$$C_4 = 0 \quad (5.71)$$

und damit eine quadratische Funktion für die Verformung des ersten Plattenabschnitts:

$$w_P(r) = C_3 r^2. \quad (5.72)$$

Aus (5.61) ergibt sich

$$C_3 = C_6 \frac{1}{2R_P^2} \left( 1 + \frac{R_P^2}{R_M^2} \frac{1-\nu}{1+\nu} \right) = C_6 \frac{1+\chi^2\kappa}{2R_P^2} \quad (5.73)$$

und mit (5.60) folgt

$$C_5 = \frac{C_6}{2} (1 - 2 \ln \chi). \quad (5.74)$$

Die Wirkung des äußeren eingepprägten Momentes wird in (5.63) erfasst. Es ergibt sich

$$C_6 = -\tilde{m}_{el} \frac{R_P^2}{N_0(1+\nu)} \cdot \frac{1}{\eta(1+\chi^2\kappa) + \kappa(1-\chi^2)}. \quad (5.75)$$

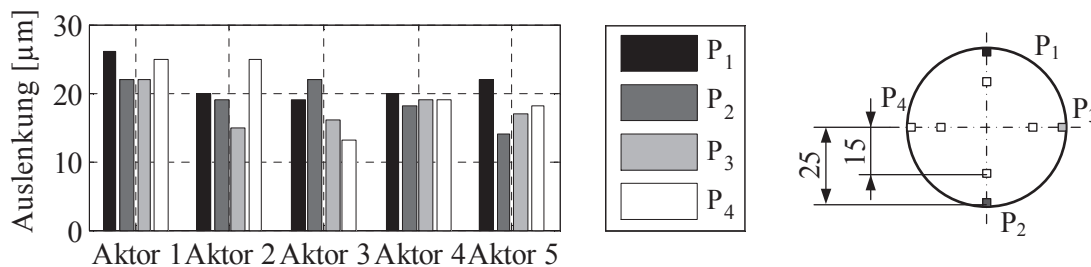
Damit sind die Konstanten vollständig bestimmt. Die Auslenkung des Aktors bei konstantem elektrischen Feld  $E$  wird, unter Verwendung der in (5.28), (5.32), (5.33), (5.53), (5.54), (5.70) und (5.75) definierten Größen, durch  $w(r)$  beschrieben. Der Zusammenhang zwischen Auslenkung und elektrischer Spannung ist linear, siehe (5.54). Die Funktion  $w(r)$  ist in Abb. 5.10 für den besprochenen Aktor dargestellt. Zum Vergleich sind die Ergebnisse aus FE-Simulationen und Experimenten eingezeichnet.

$$w(r) = \begin{cases} \frac{C_6}{2} (1 + \chi^2\kappa) \frac{r^2}{R_P^2}, & \text{wenn } 0 \leq r \leq R_P, \\ \frac{C_6}{2} \left( 1 + \kappa \frac{r^2}{R_M^2} + 2 \ln \frac{r}{R_P} \right), & \text{wenn } R_P \leq r \leq R_M. \end{cases} \quad (5.76)$$

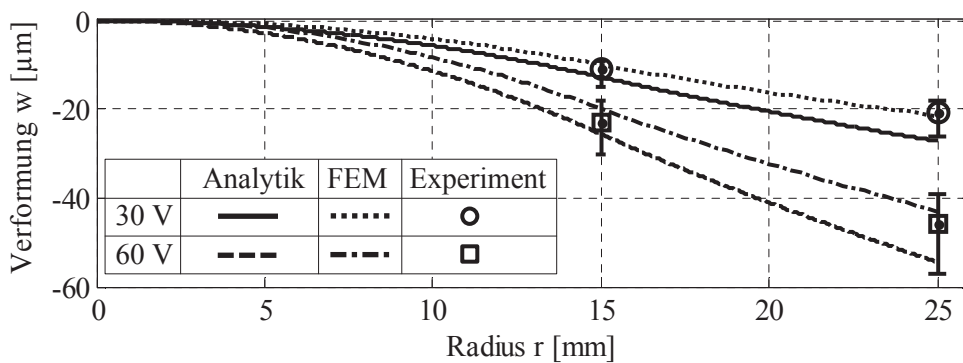
### 5.2.4 Vergleich der Auslenkung des Aktors

Ziel ist die Bewertung der analytisch ermittelten Ergebnisse  $w(r)$  und des FE-Modells. Es wird die Auslenkung von fünf baugleichen Aktoren an acht Messpunkten, siehe Abb. 5.9, für verschiedene konstante elektrische Spannungen mithilfe eines laserbasierten Abstandssensors<sup>2</sup> gemessen. Zur Befestigung dient ein Stahlstab, der durch Kleben<sup>3</sup> mittig befestigt wird. Der Stahlstab wird in einer massiven Halterung fixiert.

Abb. 5.9 zeigt, dass für eine Spannung von 30 V die Auslenkung zwischen 13  $\mu\text{m}$  und 25  $\mu\text{m}$  beträgt, in Abhängigkeit der Messpunkte  $P_1$  bis  $P_4$  und des Aktors. Die Verformung der Aktoren ist nicht rotationssymmetrisch. Die baugleichen Aktoren haben deutliche Unterschiede untereinander, die aus Fertigungstoleranzen und ungleichmäßigen Befestigungsbedingungen resultieren. In Abb. 5.10 wird ersichtlich, dass die FE-Simulationen, die Verformungsfunktion  $w(r)$  und die Mittelwerte der gemessenen Auslenkungen gute Übereinstimmungen zeigen.



**Abb. 5.9:** Statische Auslenkung baugleicher Aktoren gemessen an den Messpunkten  $P_1, \dots, P_4$  bei 30 V und Position der Messpunkte



**Abb. 5.10:** Auslenkung des Aktors: analytisch, numerisch und experimentell ermittelt

<sup>2</sup>Sensormodell: LD-1605-2, Hersteller: Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG, Deutschland

<sup>3</sup>Zweikomponenten-Epoxidharzkleber, Festigkeit: 12 N/mm<sup>2</sup>, Durchmesser Klebeverbindung:  $\approx$  3 mm

### 5.2.5 Eigenkreisfrequenzen einer elastisch gelagerten Kreisplatte



**Abb. 5.11:** Dünne Kreisplatte unter linear elastischen Randbedingungen

Der vorliegende Abschnitt gibt einen Einstieg in die dynamische Betrachtung von Platten. Ziel ist es, die grundlegenden Einflüsse der Plattenparameter und Randbedingungen auf die Eigenfrequenzen zu zeigen. Dazu werden die freien Biegeschwingungen einer linear-elastischen, rotationssymmetrischen Platte in Zylinderkoordinaten  $(r, \varphi, z)$  betrachtet. Die Verschiebung  $w$  ist eine Funktion der Koordinate  $r$  und der Zeit  $t$ . Aus (2.9) ergibt sich

$$0 = \rho h \ddot{w}(r, t) + N \Delta \Delta w(r, t). \quad (5.77)$$

Unter Anwendung des Separationsansatzes nach Bernoulli  $w(r, t) = T(t) \cdot W(r)$  kann die partielle Differentialgleichung (5.77) in die gewöhnlichen Differentialgleichungen

$$0 = \ddot{T}(t) + \omega^2 T(t), \quad (5.78)$$

$$0 = \Delta \Delta W(r) - \lambda^4 W(r) \quad (5.79)$$

separiert werden. Für den Eigenwert  $\lambda$  gilt

$$\lambda^4 = \frac{\rho h}{N} \omega^2, \quad (5.80)$$

mit der Dichte  $\rho$ , der Höhe  $h$  und der Plattensteifigkeit  $N$ .  $\omega$  ist die Eigenkreisfrequenz. Die zeitabhängige Gleichung (5.78) hat die Lösung

$$T(t) = C_1 \cos(\omega t) + C_2 \sin(\omega t). \quad (5.81)$$

Die ortsabhängige Differentialgleichung vierter Ordnung (5.79) kann in zwei gewöhnliche Differentialgleichungen zweiter Ordnung mit nicht konstanten Koeffizienten überführt werden:

$$\begin{aligned} 0 &= W'' + \frac{1}{r} W' + \lambda^2 W, \\ 0 &= W'' + \frac{1}{r} W' - \lambda^2 W. \end{aligned} \quad (5.82)$$

Sie haben die Lösungen

$$\begin{aligned} W_1(r) &= C_3 J_0(\lambda r) + C_5 Y_0(\lambda r), \\ W_2(r) &= C_4 I_0(\lambda r) + C_6 K_0(\lambda r). \end{aligned} \quad (5.83)$$

## 5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb

$J_0(\lambda r)$  und  $Y_0(\lambda r)$  sind die Bessel-Funktionen,  $I_0(\lambda r)$  und  $K_0(\lambda r)$  die modifizierten Bessel-Funktionen erster und zweiter Gattung und nullter Ordnung. Mit

$$w(r, t) = T(t) \cdot [W_1(r) + W_2(r)] \quad (5.84)$$

und der Forderung der Beschränktheit der Auslenkung

$$\lim_{r \rightarrow 0} w(r, t) \neq \infty \quad (5.85)$$

ergibt sich die allgemeine Lösung

$$w(r, t) = [C_1 \cos(\omega t) + C_2 \sin(\omega t)] [C_3 J_0(\lambda r) + C_4 I_0(\lambda r)]. \quad (5.86)$$

Unter Einbeziehung von Anfangs- und Randbedingungen können die Konstanten  $C_1, C_2, C_3$  und  $C_4$  und die Eigenwerte  $\lambda_i$  berechnet werden, woraus sich die rotationssymmetrischen Eigenformen und entsprechenden Eigenkreisfrequenzen bestimmen lassen.  $i$  gibt die Ordnung der Eigenform und der zugehörigen Eigenfrequenz an. Die Gesamtlösung von  $w(r, t)$  kann durch die Superposition  $T(t)$  und  $W(r)$  als unendliche Reihe dargestellt werden:

$$w(r, t) = \sum_{i=1}^{\infty} T_i(t) [C_{3i} J_0(\lambda_i r) + C_{4i} I_0(\lambda_i r)]. \quad (5.87)$$

In Abb. 5.11 ist das betrachtete mechanische Modell dargestellt. Die Platte ist in  $z$ -Richtung linear elastisch und frei drehbar zum Fundament gelagert. Die Gesamtsteifigkeit  $c_{ges}$  ist gleichmäßig entlang des Umfangs  $2\pi R$  verteilt und berechnet sich als Integral über die infinitesimalen Steifigkeiten  $\tilde{c}$ . Für technische Anwendungen und die FE-Modellierung ist die Darstellung als Summe über diskret verteilte Steifigkeiten  $c_j$  praktikabel.

$$c_{ges} = R \int_0^{2\pi} \tilde{c} d\varphi = \sum_j c_j \quad (5.88)$$

Die Anwendung des Impulssatzes auf ein freigeschnittenes infinitesimales Massenelement in infinitesimaler Entfernung  $dx$  vom Plattenrand  $r = R$  gibt das Gleichgewicht aus Querkraft  $\tilde{q}_r(R, t)$  und Rückstellkraft  $\tilde{c}w(R, t)$

$$0 = -\tilde{q}_r(R, t) - \tilde{c}w(R, t). \quad (5.89)$$

Die Platte ist frei drehbar gelagert, woraus die Bedingung der Biegemomentenfreiheit am Rand aus dem Drehimpulssatz resultiert:

$$0 = -\tilde{m}_r(R, t). \quad (5.90)$$

Durch Einsetzen von (5.65) und (5.66) für die längenbezogenen Schnittgrößen  $\tilde{q}_r(r, t)$  und  $\tilde{m}_r(r, t)$ , unter der Bedingung  $T(t) \neq 0, \forall t$ , ergeben sich die Randbedingungen des Problems zu

$$\begin{aligned} 0 &= N \left( W''' + \frac{1}{R} W'' - \frac{1}{R^2} W' \right) - \tilde{c}W, \\ 0 &= W'' + \frac{V}{R} W'. \end{aligned} \quad (5.91)$$



## 5.2 Statische und dynamische Untersuchung des Antriebslements

Aus (5.86) ergeben sich für die Verformungsfunktion  $W(r)$  und ihre Ableitungen

$$\begin{aligned}
 W &= C_3 J_0 + C_4 I_0, \\
 W' &= -\lambda C_3 J_1 + \lambda C_4 I_1, \\
 W'' &= -\lambda^2 C_3 \left( J_0 - \frac{1}{\lambda r} J_1 \right) + \lambda^2 C_4 \left( I_0 - \frac{1}{\lambda r} I_1 \right), \\
 W''' &= -\lambda^3 C_3 \left[ -\frac{1}{\lambda r} J_0 + \left( \frac{2}{(\lambda r)^2} - 1 \right) J_1 \right] + \lambda^3 C_4 \left[ -\frac{1}{\lambda r} I_0 + \left( \frac{2}{(\lambda r)^2} + 1 \right) I_1 \right].
 \end{aligned} \tag{5.92}$$

Durch Einsetzen von (5.92) in (5.91) ergibt sich die charakteristische Gleichung zur Bestimmung der Eigenwerte:

$$\begin{aligned}
 0 &= \left\{ 2c^*(\lambda R)^2 I_0 - [(\lambda R)^5 + c^*(1-\nu)\lambda R] I_1 \right\} J_0 \\
 &+ \left\{ - [(\lambda R)^5 + c^*(1-\nu)\lambda R] I_0 + 2(1-\nu)(\lambda R)^4 I_1 \right\} J_1.
 \end{aligned} \tag{5.93}$$

$I_0$ ,  $I_1$ ,  $J_0$  und  $J_1$  sind Funktionen von  $\lambda R$ . Der Parameter  $c^*$  beschreibt das Verhältnis der Randsteifigkeiten  $\tilde{c}$  zur charakteristischen Steifigkeit der Platte  $N/R^3$ :

$$c^* = \frac{\tilde{c}R^3}{N}. \tag{5.94}$$

Für die Abschätzung des Einflusses der elastischen Randbedingungen auf die Eigenfrequenz einer Kreisplatte werden die folgenden Beispielparameter verwendet:

$$N = 0,2607 \text{ Nm}, \quad R = 25 \text{ mm}.$$

Sie haben die Größenordnung des zuvor beschriebenen Aktors. Die Randsteifigkeit  $\tilde{c}$  wird als gleichmäßig über den Umfang des Aktors verteilte Steifigkeit gegen Biegung von drei 50 mm langen, geraden Beinen aus Kupferdraht mit  $D = 1$  mm, wie in Abschnitt 5.3 betrachtet, mit  $c_{ges} = 3 \cdot \frac{3EI_z}{L^3}$  abgeschätzt. Es folgt für das Verhältnis von Rand- zu Plattensteifigkeit

$$c^* \approx 0,178.$$

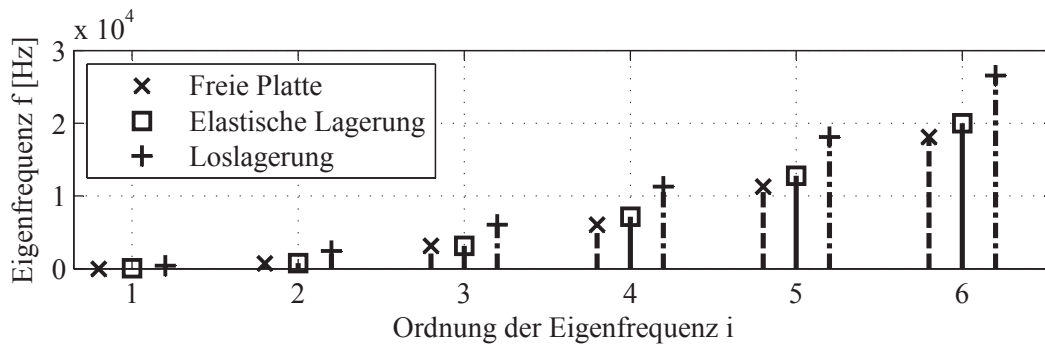
Für die Extremfälle von  $\tilde{c}$  gegen unendlich und gegen null, werden die Eigenwerte der am Rand drehbar gelagerten Platte, welche die Randbedingungen  $w(R,t) = 0$ ,  $\tilde{m}_r(R,t) = 0$  erfüllt, und die der freien Platte mit  $\tilde{m}_r(R,t) = 0$ ,  $\tilde{q}_r(R,t) = 0$  erhalten. Aus den Eigenwerten  $\lambda_i$  und den konstanten Plattenparametern lassen sich nach (5.80) die Eigenfrequenzen  $f_i = \omega_i/2\pi$  bestimmen:

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N}{\rho h}} \frac{1}{R^2} (\lambda_i R)^2. \tag{5.95}$$

Der Einfluss der geometrischen Größen, des Werkstoffs und der Lagerung auf die Eigenfrequenz wird aus (5.95) und aus Abb. 5.12 ersichtlich. Die ersten sechs Eigenfrequenzen sind in Abb. 5.12 dargestellt. Durch die Werte der freien und losgelagerten Platte kann der Bereich der Eigenfrequenzverschiebung abgeschätzt werden.

Hier sollen auf analytischem Wege lediglich grundlegende Einblicke gegeben werden. Für weiterführende Betrachtungen zum Schwingungsverhalten von Systemen mit geringerem Abstraktionsgrad wird experimentellen und FE-basierten Methoden der Vorrang eingeräumt.

## 5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb



**Abb. 5.12:** Eigenfrequenzen der rotationssymmetrischen Eigenformen einer homogenen Kreisplatte mit  $h = 0,3 \text{ mm}$ ,  $R = 25 \text{ mm}$ ,  $\rho = 8500 \text{ kg/m}^3$ ,  $N = 0,2607 \text{ Nm}$  mit verschiedenen Randbedingungen:  $\times$  - Theoretischer Fall der freien Platte;  $\square$  - Platte mit linear-elastischer Lagerung (siehe Abb. 5.11) mit  $\tilde{c} = 2970 \text{ N/m}^2$ ;  $+$  - Frei drehbar gelagerte Platte ohne Randverschiebung

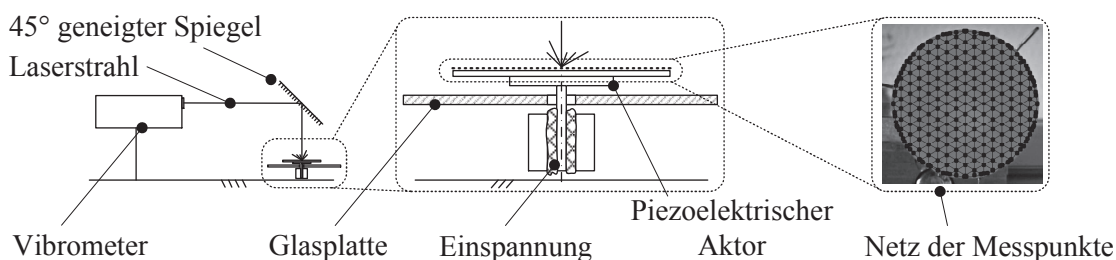
### 5.2.6 Experimentelle dynamische Analyse des Aktors

In diesem Unterkapitel wird das frequenzabhängige Schwingungsverhalten der beschriebenen piezoelektrischen Biegeaktoren experimentell untersucht. Ziel ist es, den Einfluss verschiedener Randbedingungen zu ermitteln und die Eignung solcher Aktoren als Antriebselemente für mobile Roboter zu prüfen.

Der Aktor wird mit einer Wechselspannung von  $24 \text{ V}$  angesteuert. Das Untersuchungsintervall liegt zwischen  $12,5 \text{ Hz}$  und  $20 \text{ kHz}$ .

#### Messaufbau und Durchführung der Messungen

Zur Messung der Schwingungsformen wird ein auf dem Doppler-Effekt basierendes Laser-Vibrometer<sup>4</sup> benutzt. Der Messaufbau ist in Abb. 5.13 dargestellt. Der Laserstrahl wird über einen Spiegel auf das Messobjekt gelenkt. Der schwingende Piezoaktor wird punktweise abgetastet und eine Geschwindigkeitsmessung für jeden Messpunkt durchgeführt. Die Synchronisation, d. h. der Ausgleich der Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Messungen, erfolgt automatisch. Die Werte zwischen den Messpunkten werden interpoliert. Die Befestigung des Aktors ist in Abschnitt 5.2.4 beschrieben.



**Abb. 5.13:** Messaufbau für die Ermittlung der Schwingungsformen eines piezoelektrischen Biegeaktors und Netz der Messpunkte auf dem Aktor

<sup>4</sup>Modell: PSV 300, Hersteller: Polytec GmbH, Deutschland

## 5.2 Statische und dynamische Untersuchung des Antriebslements

Die Frequenz der Wechselspannung wird im Untersuchungsintervall schrittweise erhöht. Das Schwingungsverhalten von jedem Messobjekt wird für 1600 diskrete Frequenzwerte ermittelt. Pro Frequenz werden 400 Werte gemessen bzw. interpoliert.

### Vergleich zweier baugleicher Aktoren

In Abschnitt 5.2.4 wurde gezeigt, dass baugleiche Aktoren eine hohe Streuung der statischen Auslenkung für gegebene elektrische Spannungen aufweisen. Unterschiede werden auch im frequenzabhängigen Schwingungsverhalten erwartet. Zur Bewertung werden zwei Aktoren untersucht und mit Ergebnissen aus der FE-basierten Modalanalyse verglichen.

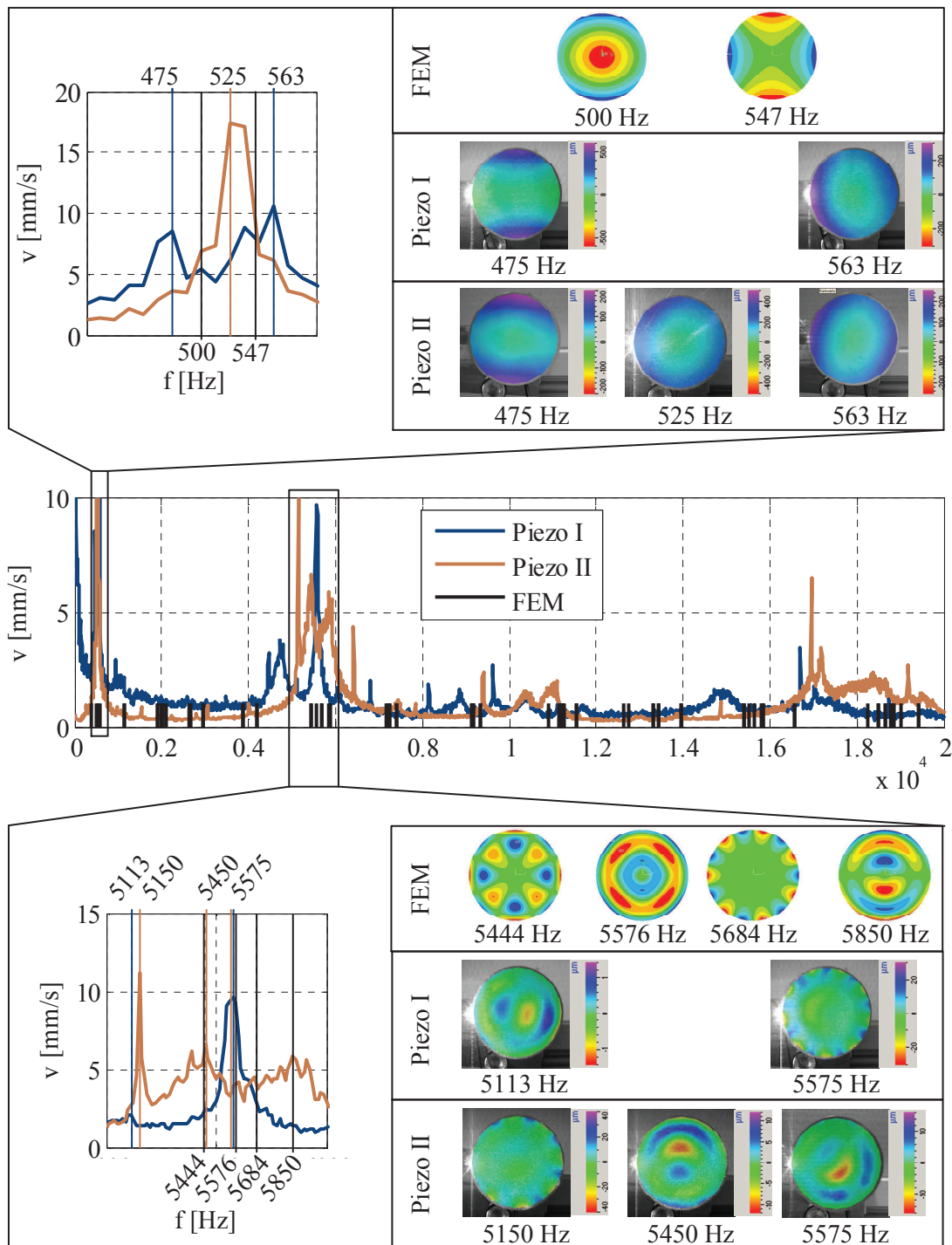
Die Ergebnisse sind als Amplituden-Frequenzgang in Abb. 5.14 dargestellt. Gezeigt werden die aus 400 Werten gemittelten Geschwindigkeiten  $v$  in Abhängigkeit der Frequenz. Die Lage der Maxima wird in dieser Darstellung deutlich. Da die Schwingung harmonisch ist, kann die gemittelte Auslenkung  $x$  mit  $x = v/2\pi f$  berechnet werden [Gmb00]. In Abb. 5.14 sind zusätzlich die Eigenfrequenzen des FE-Modells mittels schwarzer Linien markiert.

Die Abbildung zeigt Ähnlichkeiten und Unterschiede zweier baugleicher Aktoren. Vergleichbare „Peaks“ liegen beispielsweise im Bereich von 500 Hz bis 560 Hz. Zwischen 4000 Hz und 6000 Hz hingegen zeigen sich deutliche Unterschiede. Die entsprechenden Schwingungsformen werden mit ihrer jeweiligen Farbskala abgebildet. Die Auslenkung in Mikrometern kann mithilfe dieser Skala abgeschätzt werden.

Im ersten Bereich zeigt sich, dass die Ansteuerung der Aktoren in der Nähe ihrer ersten Eigenfrequenz zu Auslenkungen führen kann, die bis zu zwanzigmal größer sind, als die statische Auslenkung bei gleicher elektrischer Amplitude. Die ermittelten Schwingungsformen beider Aktoren und der FE-Analyse bestätigen einander.

Im zweiten Intervall liegen deutliche „Peaks“ des Amplituden-Frequenzgangs. Trotz der höheren Schwingungsmoden können Auslenkungen erzielt werden, die die statische Verformung übersteigen. Die Schwingungsformen der beiden Aktoren für eine Frequenz unterscheiden sich in der geometrischen Form und der Amplitude. Geometrisch ähnliche Schwingungsformen der beiden Aktoren können durch eine Anpassung der Erregungsfrequenz erzeugt werden. Die sich überlagernden Eigenformen können aus den FE-Analyse abgeleitet werden.

Die Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass sich das frequenzabhängige Schwingungsverhalten von baugleichen Aktoren unterscheidet.



**Abb. 5.14:** Amplituden-Frequenzgang und Schwingungsformen der piezoelektrischen Biegeaktoren mit freiem Rand: FE-basierte Modalanalyse und Vibrometer-Messungen zweier baugleicher Aktoren

### Vergleich eines Aktors mit verschiedenen Randbedingungen

In der Anwendung als Antriebselement für mobile Roboter, siehe Abschnitt 5.4, sind die Aktoren Teil eines schwingungsfähigen Systems. Es besteht aus dem Antriebselement und den drei Übertragungselementen (Beinen). Die Bewegung der Roboter zeichnet sich, wie im Verlauf der Arbeit gezeigt wird, durch periodischen Kontaktverlust aus, was einer Änderung der Randbedingungen des Systems entspricht.

Zur Untersuchung dieses Einflusses werden an dem mittig fixierten Aktor drei Kupferdrähte ( $L = 50$  mm,  $D = 1$  mm) im Winkel von  $120^\circ$  zueinander durch Lötens befestigt, vergl. Abb. 5.1, und das Schwingungsverhalten des Aktors bestimmt. Es werden drei Konfigurationen von Randbedingungen untersucht. Das sind:

1. freier Rand,
2. am Rand befestigte Drähte mit freiem Ende und
3. am Rand befestigte Drähte mit Kontakt zu einem Untergrund aus Glas.

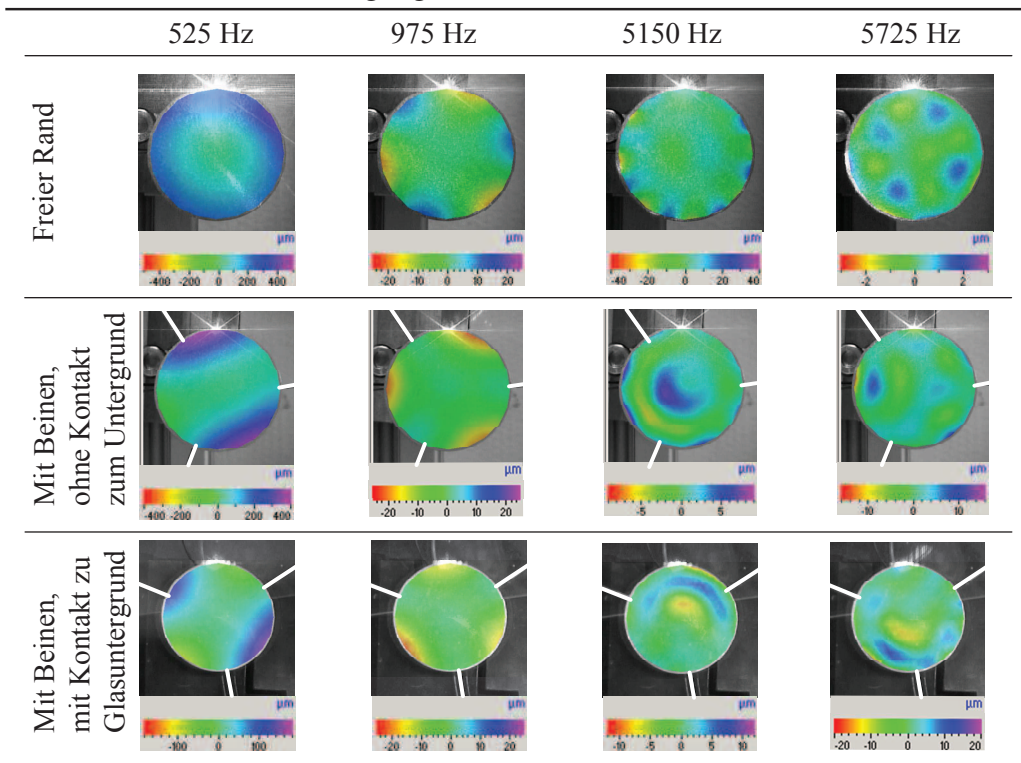
Die Untersuchungen können nur eine Abschätzung der eigentlichen Roboter liefern, da die Aktoren hier mittig fixiert sind, ein realer Roboter aber keine Einspannung besitzt. In Tab. 5.3 sind Schwingungsformen für ausgewählte Frequenzen dargestellt. Die Beine sind weiß nachgezeichnet.

Für eine Erregungsfrequenz von 525 Hz ergeben sich Randverschiebungen von bis zu  $400 \mu\text{m}$ . Die Schwingungsform des Aktors mit freiem Rand ist rotationssymmetrisch. Die Anbringung der Beine führt zu einer talförmigen Gestalt und die maximale Auslenkung des Antriebs sinkt. Werden die Beine in Kontakt zum Untergrund gebracht, reduziert sich die Auslenkung weiter.

Die Betrachtung von 975 Hz ergibt für alle Randbedingungen eine ähnliche Schwingungsform. Allerdings zeigt sich, dass an den Kontaktstellen der Beine die Amplituden deutlich geringere Werte annehmen, als am freien Rand. Die Berührung der Beine mit dem Untergrund ergibt keine wesentlichen Änderungen.

Die Vergleiche für 5150 Hz und 5725 Hz zeigen, dass der Wechsel der Randbedingungen die Schwingungsformen, und damit auch die Auslenkungen der Beine, deutlich beeinflussen können. Besonders bemerkenswert ist, dass sich die Schwingungsamplituden durch die Anbringung der Beine und die zusätzlichen Kontaktbeziehungen auch vergrößern können. Der Wechsel der Randbedingungen beeinflusst die Schwingungsformen und Resonanzfrequenzlagen. Die Abbildungen in Tab. 5.3 zeigen signifikante Unterschiede.

**Tab. 5.3:** Schwingungsformen eines mittig befestigten piezoelektrischen Biegeaktors mit verschiedenen Randbedingungen



### 5.2.7 Ausblick zur Anwendung der Aktoren in mobilen Robotern

Die Untersuchungen zeigen, dass die besprochenen Aktoren für die Erzeugung von inneren Schwingungen in mobilen Robotern im untersuchten Frequenzbereich geeignet sind. Die Ansteuerung mit einer hochfrequenten Wechselspannung erzeugt eine mechanische Schwingung gleicher Frequenz. Die konkrete Schwingungsform ist in Geometrie und Amplitude abhängig der Randbedingungen und von Aktor zu Aktor unterschiedlich. Durch Änderung der Frequenz lassen sich ähnliche Schwingungsformen erzeugen. Diese Effekte sind im Designprozess von mobilen Robotern zu beachten. Sie schränken die Erzeugung eines definierten frequenzabhängigen Bewegungsverhaltens ein.

Für den Einsatz der Aktoren in mobilen Robotern sprechen, neben den in Abschnitt 2.5 beschriebene Eigenschaften piezoelektrischer Biegeaktoren, der günstige Preis und die einfache Integrierbarkeit in elastische Systeme, z. B. durch das Fügeverfahren Löten. Die Amplitude der Auslenkung des Antriebs ist im Vergleich zu seinen Abmessungen gering.



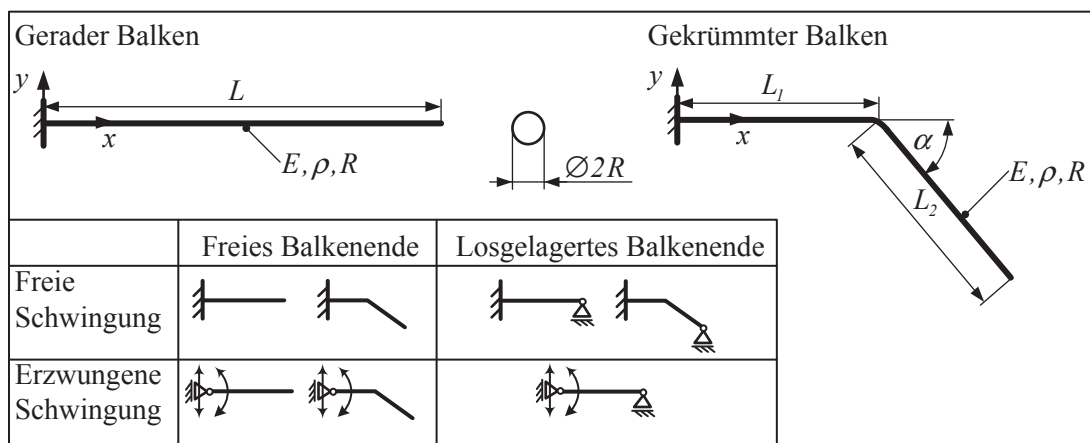
## 5.3 Dynamische Untersuchung der Übertragungselemente

Für die Dimensionierung von vibrationsgetriebenen Bewegungssystemen ist das frequenzabhängige Schwingungsverhalten der Übertragungselemente von besonderer Bedeutung. Im vorliegenden Abschnitt wird die Wirkung verschiedener Einflussgrößen, wie Material, Geometrie, Erregungsfrequenz und Randbedingungen, auf das Schwingungsverhalten analysiert. Wie in Abb. 5.15 dargestellt, werden die Untersuchungen an geometrisch einfachen Übertragungselementen durchgeführt:

- dem geraden Balken der Länge  $L$  und
- dem gekrümmten Balken, definiert durch die Längen  $L_1$ ,  $L_2$  und den Winkel  $\alpha$ .

Die für die Berechnungen verwendeten Zahlenwerte sind in Tab. 5.4 gegeben. Behandelt werden die Balken mit kreisrundem Querschnitt und verschiedenen Randbedingungen als ebenes Problem. Freie und erzwungene Schwingungen werden betrachtet. Die Erregung erfolgt kinematisch in Form einer überlagerten Randverschiebung und Randverdrehung. Die Amplituden entsprechen der statischen Auslenkung der betrachteten Aktoren für 30 V, siehe Abb. 5.10, und werden für die gesamte Frequenzbandbreite vorausgesetzt.

Der gerade Balken ist in seinen Eigenschaften vollständig analytisch beschreibbar und dient als Vergleichssystem. Zur Berechnung des gekrümmten Balkens werden FE-Modelle verwendet, die mit den Programmpaketen ANSYS® Workbench™ 14.5 und ANSYS Mechanical APDL™ 14.5 erstellt und simuliert werden. Für die analytischen Betrachtungen wird der gerade Balken nach der Euler-Bernoulli-Theorie modelliert.



**Abb. 5.15:** Modelle für die analytischen und FE-gestützten Betrachtungen der Übertragungselemente: Einseitig eingespannter, gerader und einfach gekrümmter Balken mit freiem und losgelagertem Rand; Kinematische Erregung der erzwungenen Schwingungen durch die Überlagerung einer Randverschiebung und Randverdrehung

## 5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb

Nach [Gro02] können mit dieser Theorie hinreichend genaue Ergebnisse erzielt werden, wenn für die Ordnung der Eigenfrequenz  $i$  gilt

$$i < \frac{L}{10 R}. \quad (5.96)$$

Für die verwendeten Parameter können Eigenfrequenzen bis zur achten Oberschwingung genau bestimmt werden. In ANSYS werden für die numerischen Rechnungen BEAM188-Elemente verwendet. Sie basieren auf der Balkentheorie nach Timoshenko und berücksichtigen Scherverformungen erster Ordnung. Das System verhält sich weniger steif, was geringere Eigenfrequenzen zur Folge hat.

Energieverluste sind in schwingenden mechanischen Systemen stets vorhanden. Die Dissipation hängt von den konkreten frequenzabhängigen Belastungszuständen, Material- und Umgebungsparametern ab [Dre09]. Hier wird von einer schwachen Dämpfung ausgegangen, sodass die Eigenkreisfrequenzen des gedämpften Systems  $\omega_d$  praktisch gleich denen des ungedämpften Systems  $\omega$  sind. Für die analytischen Betrachtungen und die FE-Modalanalysen wird Dämpfung nicht berücksichtigt. In den FE-basierten transienten Analysen der erzwungenen Schwingungen werden Resonanzamplituden ermittelt. Hier wird eine frequenzunabhängige Materialdämpfung verwendet. Da nur vergleichende Aussagen angestrebt werden, sind die absoluten Werte von untergeordneter Bedeutung.

**Tab. 5.4:** Parameter für die Untersuchung der Übertragungselemente (Beine) aus kaltumgeformtem Kupferdraht

	Gerader Balken		Gebogener Balken		
<i>Geometrie</i>					
Länge	$L$	50	$L_1$	25	mm
			$L_2$	25	mm
Radius	$R$	0,5	$R$	0,5	mm
Biegewinkel			$\alpha$	45	°
<i>Werkstoff</i>					
E-Modul	$E$	132	$E$	132	GPa
Dichte	$\rho$	8940	$\rho$	8940	kg/m <sup>3</sup>
Querkontraktionszahl	$\nu$	0,34	$\nu$	0,34	
<i>Kinematische Erregung</i>					
Randverschiebung	$v_0$	20	$v_0$	20	$\mu\text{m}$
Randverdrehung	$\varphi_0$	0,06	$\varphi_0$	0,06	°



### 5.3.1 Analytische Betrachtung der freien Schwingung des geraden Balkens

Die partielle Differentialgleichung vierter Ordnung für die freie Schwingung des Euler-Bernoulli-Balkens lautet

$$EI_z v''''(x, t) + \rho A \ddot{v}(x, t) = 0. \quad (5.97)$$

Unter Verwendung des Ansatzes  $v(x, t) = T(t) \cdot X(x)$  folgt die allgemeine Lösung

$$v(x, t) = \left[ C_1 \cos(\omega t) + C_2 \sin(\omega t) \right] \left[ C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x + C_5 \cosh \lambda x + C_6 \sinh \lambda x \right], \quad (5.98)$$

mit der Eigenkreisfrequenz  $\omega$  und dem Eigenwert  $\lambda$ . Sie sind über geometrische und werkstoffspezifische Parameter verknüpft:

$$\lambda^4 = \frac{\rho A}{EI_z} \omega^2. \quad (5.99)$$

Die Querschnittsfläche des Balkens ist  $A = \pi R^2$  und das äquatoriale Flächenträgheitsmoment berechnet sich nach  $I_z = \frac{\pi}{4} R^4$ . Für beide Lagerungen gelten die Randbedingungen

$$v(0, t) = 0, \quad v'(0, t) = 0. \quad (5.100)$$

und

$$v''(L, t) = 0. \quad (5.101)$$

Weitere Bedingungen sind:

$$\begin{aligned} \text{Freies Balkenende: } & v'''(L, t) = 0, \\ \text{Losgelagertes Balkenende: } & v(L, t) = 0. \end{aligned} \quad (5.102)$$

Die charakteristischen Gleichungen (5.103) zur Bestimmung der Eigenwerte ergeben sich durch Einsetzen der Randbedingungen in (5.98) und der Bedingung, dass die Koeffizientenmatrix des jeweiligen Gleichungssystems singular sein soll.

$$\begin{aligned} \text{Freies Balkenende: } & 1 + \cos \lambda L \cosh \lambda L = 0, \\ \text{Losgelagertes Balkenende: } & \sin \lambda L \cosh \lambda L - \cos \lambda L \sinh \lambda L = 0 \end{aligned} \quad (5.103)$$

Exemplarisch werden in Tab. 5.5 die ersten sechs, der unendlich vielen, Lösungen gelistet. Die Zahlenwerte verdeutlichen die Steifigkeitsunterschiede der Systeme.

**Tab. 5.5:**  $\lambda_i L$  des geraden Balkens für verschiedene Randbedingungen

Freies Balkenende		Losgelagertes Balkenende	
$\lambda_1 L = 1,875$	$\lambda_4 L = 10,995$	$\lambda_1 L = 3,927$	$\lambda_4 L = 13,352$
$\lambda_2 L = 4,694$	$\lambda_5 L = 14,137$	$\lambda_2 L = 7,068$	$\lambda_5 L = 16,493$
$\lambda_3 L = 7,855$	$\lambda_6 L = 17,279$	$\lambda_3 L = 10,210$	$\lambda_6 L = 19,635$

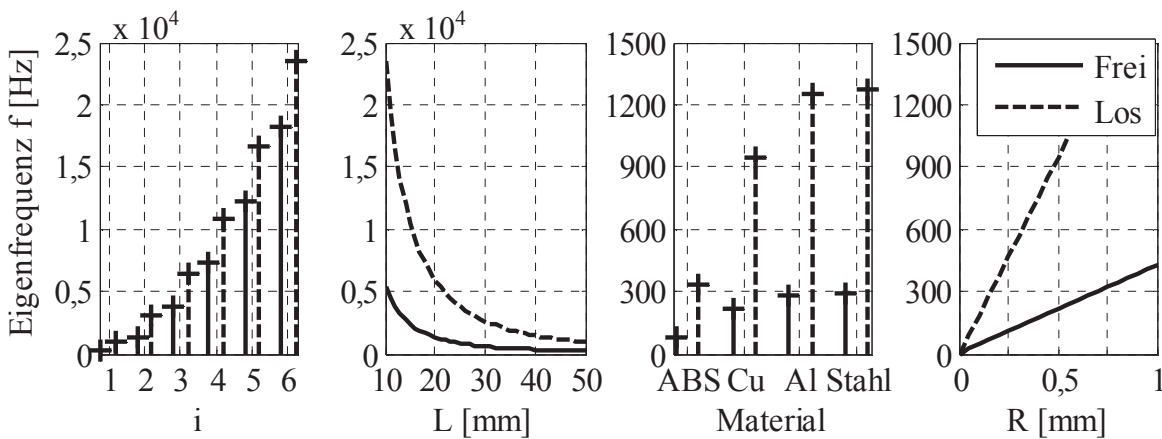
## 5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb

Aus den Werten können mit (5.99) die Eigenfrequenzen  $f_i$  berechnet werden:

$$f_i = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{R}{L^2} (\lambda_i L)^2. \quad (5.104)$$

In Abb. 5.16 sind für einen Parametersatz die ersten sechs Eigenfrequenzen für die beiden Lagerungen dargestellt. Der Einfluss von Länge und Radius auf die Höhe der ersten Eigenfrequenz wird verdeutlicht. Beispielhaft sind die Werte für in dieser Arbeit verwendete Konstruktionswerkstoffe gegeben:

- Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS):  $E = 2 \text{ GPa}$ ,  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,
- Kupfer (Cu):  $E = 132 \text{ GPa}$ ,  $\rho = 8940 \text{ kg/m}^3$ ,
- Aluminium (Al):  $E = 70 \text{ GPa}$ ,  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ ,
- Stahl:  $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ .



**Abb. 5.16:** Eigenfrequenzen des einseitig eingespannten Balkens mit freiem und losgelagertem Ende:  $i = 1$  - Grundschwingung,  $i > 1$  - Oberschwingungen; ansonsten ist die Frequenz der Grundschwingung dargestellt

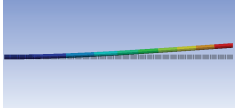
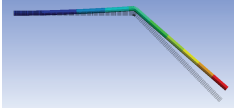
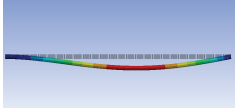
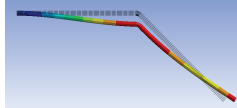
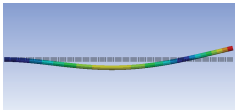
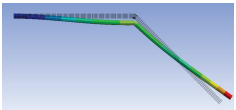
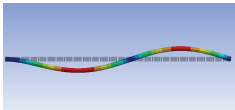
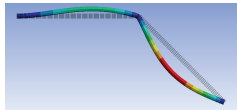
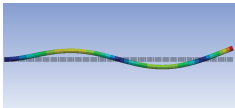
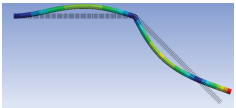
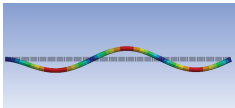
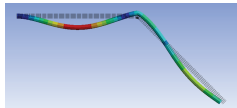
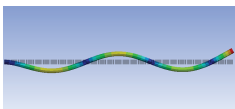
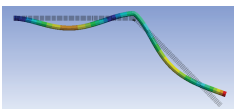
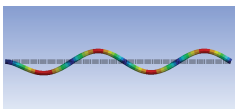
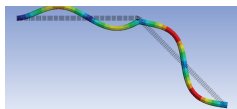
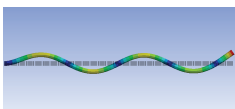
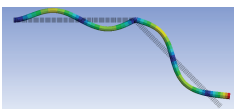
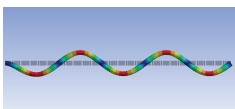
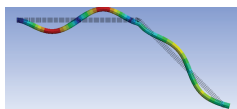
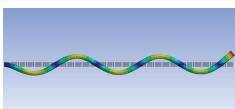
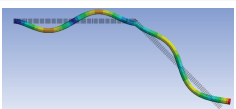
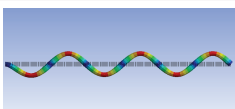
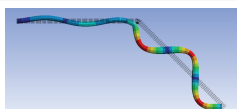
### 5.3.2 FE-Berechnung der freien Schwingungen des geraden und gekrümmten Balkens

Zur Berechnung wird eine FE-Modalanalyse der Balken durchgeführt. Die ersten sechs Eigenformen der Biegeschwingungen und Eigenfrequenzen sind in Tab. 5.6 dargestellt. Die FE-Ergebnisse des geraden Balkens stimmen mit den analytisch ermittelten Werten mit einer Abweichung zwischen 0 % (Grundschwingung) und 16 % (5. Oberschwingung) überein. Die Werte der FE-Simulationen sind geringer als die nach der Euler-Bernoulli-Theorie bestimmten. Die Abweichungen nehmen mit der Ordnung der Eigenform zu. Die Systeme mit losgelagertem Balkenende sind steifer als die mit freiem Rand.

### 5.3 Dynamische Untersuchung der Übertragungselemente

Für die frequenzabhängige Dimensionierung derartiger Übertragungselemente, verdient der Umstand Beachtung, dass sich die Eigenfrequenzen zwischen geraden und gekrümmtem Balken nur geringfügig unterscheiden. Dies wird besonders deutlich, wenn ein Schwingungsknoten in der Biegestelle liegt, wie bei  $f_3$  und  $f_5$  des freien oder  $f_4$  des losgelagerten Balkens. Sind für die Auslegung eines Übertragungselementes die geometrischen Abmessungen bekannt, können die Eigenfrequenzen der Schwingungsformen durch (5.103) bzw. mithilfe von (5.104) und den Werten aus Tab. 5.5 abgeschätzt werden. Die Betrachtung des geraden Balkens liefert demnach bereits wichtige Ergebnisse für ein System mit gekrümmten Übertragungselementen.

**Tab. 5.6:** Eigenformen und Eigenfrequenzen des einseitig eingespannten Balkens mit unterschiedlicher Endlagerung (FE-Modalanalysen)

	Freies Balkenende		Losgelagertes Balkenende	
$f_1$	 215 Hz	 230 Hz	 941 Hz	 980 Hz
$f_2$	 1344 Hz	 1074 Hz	 3044 Hz	 2799 Hz
$f_3$	 3756 Hz	 3757 Hz	 6331 Hz	 5219 Hz
$f_4$	 7335 Hz	 6188 Hz	 10782 Hz	 10698 Hz
$f_5$	 12074 Hz	 12074 Hz	 16371 Hz	 14907 Hz
$f_6$	 17943 Hz	 15360 Hz	 23065 Hz	 21446 Hz

### 5.3.3 Analytische Betrachtung der erzwungenen Schwingungen des geraden Balkens

Zur Beschreibung der erzwungenen Schwingungen des Balkens wird (5.97) durch eine harmonische Streckenlast  $q(x,t) = q(x) \cos \Omega t$  mit der Erregungskreisfrequenz  $\Omega$  erweitert:

$$EI_z v'''' + \rho A \ddot{v} = q(x,t). \quad (5.105)$$

Somit kann für den eingeschwungenen Zustand die partikuläre Lösung

$$v(x,t) = X(x) \cos \Omega t \quad (5.106)$$

angenommen werden. Aus (5.105) folgt die gewöhnliche, inhomogene Differentialgleichung

$$EI_z X'''' - \rho A \Omega^2 X = q(x). \quad (5.107)$$

Im vorliegenden Problem wird die Erregung durch kinematische Zwangsbedingungen am Rand modelliert, siehe Abb. 5.15. Daraus folgt  $q = 0$  und aus (5.107) ergibt sich in Analogie zu (5.99)

$$\Lambda^4 = \frac{\rho A}{EI_z} \Omega^2, \quad (5.108)$$

mit dem Eigenwert  $\Lambda$  der erzwungenen Schwingung. Es folgt

$$v(x,t) = \left[ C_3 \cos \Lambda x + C_4 \sin \Lambda x + C_5 \cosh \Lambda x + C_6 \sinh \Lambda x \right] \cos \Omega t. \quad (5.109)$$

Für die kinematische Erregung gelten die Randbedingungen

$$v(0,t) = v_0 \cos \Omega t, \quad v'(0,t) = \varphi_0 \cos \Omega t. \quad (5.110)$$

Am rechten Rand sind weiterhin die Bedingungen (5.101) und (5.102) gegeben. Aus (5.101) folgt

$$C_5 = v_0 - C_3, \quad C_6 = \frac{\varphi_0}{\Lambda} - C_4 \quad (5.111)$$

und aus (5.102) ergibt sich

$$C_4 = \frac{-C_3(\cos \Lambda L + \cosh \Lambda L) + v_0 \cosh \Lambda L + \frac{\varphi_0}{\Lambda} \sinh \Lambda L}{\sin \Lambda L + \sinh \Lambda L}. \quad (5.112)$$

In Abhängigkeit der Lagerung gilt für das freie Balkenende:

$$C_3 = \frac{v_0}{2} \left[ 1 - \frac{\sin \Lambda L \sinh \Lambda L}{1 + \cos \Lambda L \cosh \Lambda L} \right] + \frac{\varphi_0}{2\Lambda} \frac{\cos \Lambda L \sinh \Lambda L - \sin \Lambda L \cosh \Lambda L}{1 + \cos \Lambda L \cosh \Lambda L}, \quad (5.113)$$

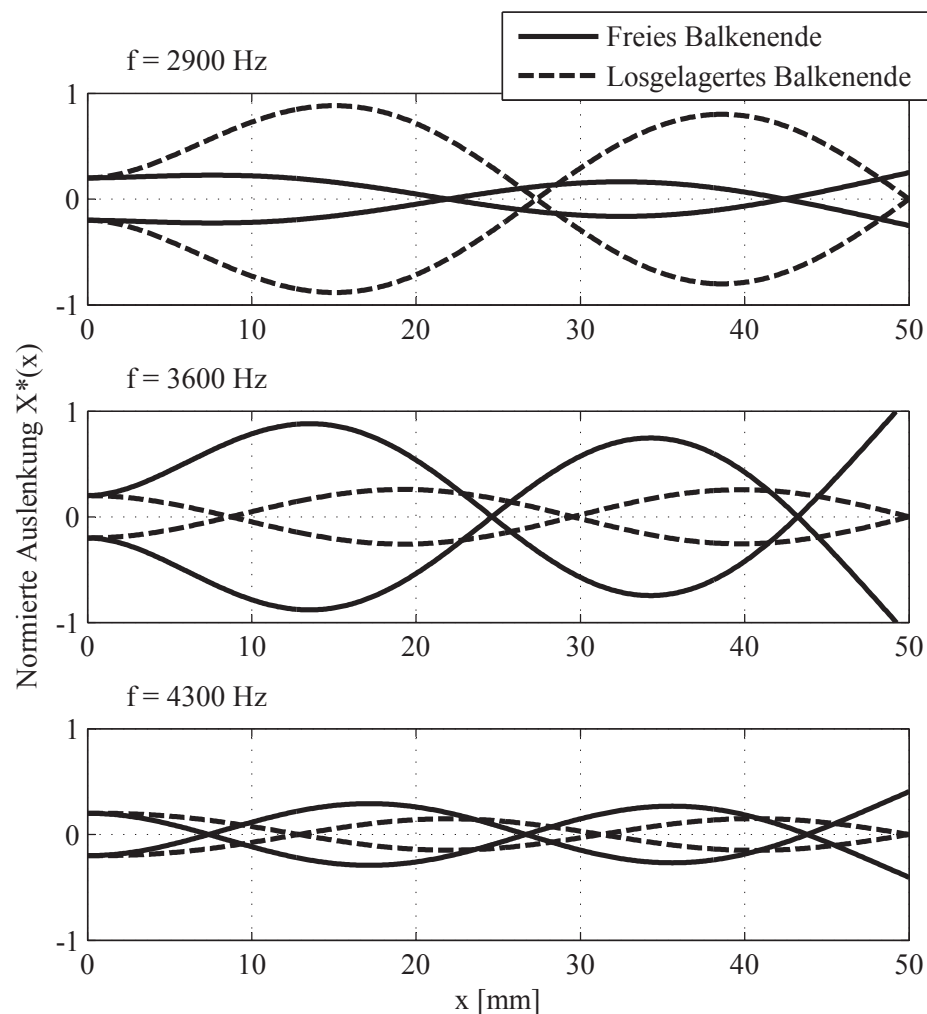
und für das losgelagerte Balkenende:

$$C_3 = \frac{v_0 \sin \Lambda L \cosh \Lambda L + \frac{\varphi_0}{\Lambda} \sin \Lambda L \sinh \Lambda L}{\sin \Lambda L \cosh \Lambda L - \cos \Lambda L \sinh \Lambda L}. \quad (5.114)$$

### 5.3 Dynamische Untersuchung der Übertragungselemente

In Abb. 5.17 sind die Schwingungsformen der unterschiedlich gelagerten Balken für verschiedene Erregungsfrequenzen dargestellt. Wird die Frequenz schrittweise gesteigert, wächst die Amplitude mit Annäherung an die Eigenfrequenz, bis sie unendlich große Werte annimmt. Hier werden die größten Amplituden auf den Wert eins normiert. Beim Durchlaufen der Eigenfrequenz schlägt die Schwingungsform um, was durch eine Erhöhung der Knotenanzahl deutlich wird.

Abb. 5.17 illustriert des Weiteren die Abhängigkeit der Schwingungsform von den Randbedingungen. Beispielsweise unterscheidet sich die Knotenanzahl für  $f = 3600$  Hz für die betrachteten Lagerungen. Wie im Weiteren experimentell nachgewiesen wird, verlieren die Beine der Roboter während der Bewegung periodisch den Kontakt zum Untergrund. Dies kann zu einem periodischen Umschlagen der Eigenformen führen.



**Abb. 5.17:** Übergang der Schwingungsformen für verschiedene Erregungsfrequenzen  $f$  bei Überschreiten einer Eigenfrequenz: Dritte Eigenfrequenz des Balkenes mit freiem Ende  $f_{r3} = 3773$  Hz; Zweite Eigenfrequenz des Balkenes mit losgelagertem Ende  $f_{r2} = 3065$  Hz

### 5.3.4 FE-Betrachtung der erzwungenen Schwingungen des gekrümmten Balkens

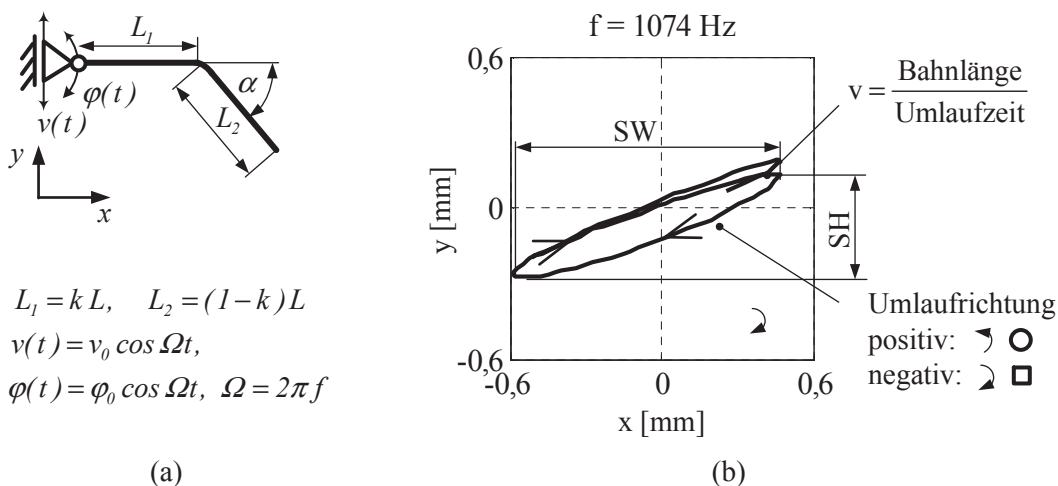
Die erzwungenen Schwingungen von gekrümmten Balken werden mithilfe von transienten FE-Simulationen untersucht. Ziel ist die Ermittlung der Trajektorien des Balkenendpunktes in der  $xy$ -Ebene für verschiedene Balkengeometrien und Erregungsfrequenzen.

In ANSYS wird eine  $\beta_j$ -Dämpfung von 0,00012 berücksichtigt. Durch die für die hochfrequente Schwingung von metallischen Werkstoffen vergleichsweise große Materialdämpfung sind die Resonanzstellen schwächer ausgeprägt.  $\beta_j$  ist im Berechnungsalgorithmus ein Multiplikator der Steifigkeitsmatrix des Systems, d. h. höhere Eigenformen werden stärker gedämpft als niedrigere. Für die Berechnung exakter Werte ist die experimentelle Ermittlung der frequenzabhängigen Dämpfungswerte notwendig. Im Rahmen der getroffenen Annahmen und qualitativen Ziele der Analyse sind die hier ermittelten Ergebnisse jedoch hinreichend.

Wie in Abb. 5.18 dargestellt, werden zur Auswertung der Schwingungen die Breite  $SW$  (Schrittweite), die Höhe  $SH$  (Schritthöhe), die Umlaufgeschwindigkeit  $v$  und die Umlaufrichtung der Trajektorien verwendet. Die Umlaufrichtung wird aus dem Einschwingverhalten bestimmt. Für die Ermittlung von  $SH$ ,  $SW$  und  $v$  wird eine Periode der stationären Schwingung analysiert.

Die Simulationsergebnisse sind in Abb. 5.19 und Abb. 5.20 dargestellt. Es zeigt sich, dass sich  $SW$ ,  $SH$  und  $v$  mit steigender Frequenz verringern, in der Nähe der Eigenfrequenzen aber lokale Maxima annehmen, siehe Abb. 5.19. In der Umgebung der dritten Eigenfrequenz  $f_{r3}$  kommt es zu einem Wechsel der Umlaufrichtung.

Abb. 5.20 zeigt die Geometrieabhängigkeit der Trajektorien. Auf Basis der Parameter aus Tab. 5.4 werden der Winkel  $\alpha$  sowie die Länge der Balkenteile  $L_1 = kL$  und  $L_2 = (1 - k)L$  mittels  $k$  variiert. Jede Kombination wird mit 95 % ihrer zweiten Eigenfrequenz angeregt, um numerischen Problemen bzw. dem Umschlagen der Schwingungsform vorzubeugen.



**Abb. 5.18:** Ermittlung der Trajektorien des Endpunktes eines gekrümmten Balkens unter erzwungener Schwingung, vergl. Abb. 5.15: (a) - Mechanisches Modell und geometrischen Größen; (b) - Beispieltrajektorie mit Definition der Größen: Umlaufrichtung,  $v$ ,  $SW$ , und  $SH$

### 5.3 Dynamische Untersuchung der Übertragungselemente

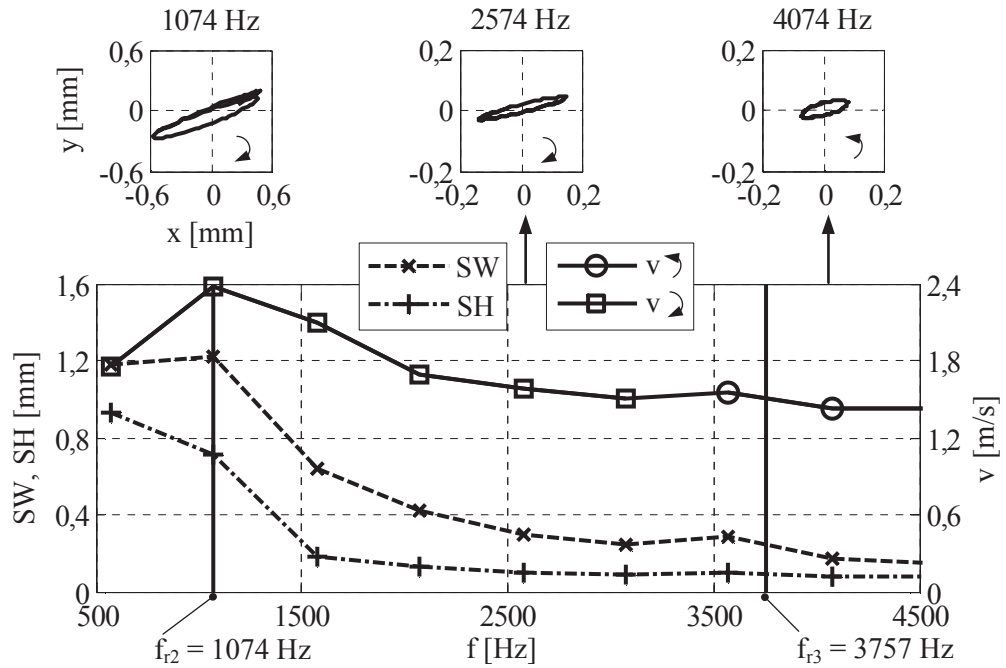


Abb. 5.19: Erregungsfrequenzabhängigkeit der Trajektorien eines Balkens mit  $\alpha = 45^\circ$  und  $k = 0,5$ ;  $f_{r2}$ ,  $f_{r3}$  - zweite und dritte Eigenfrequenz

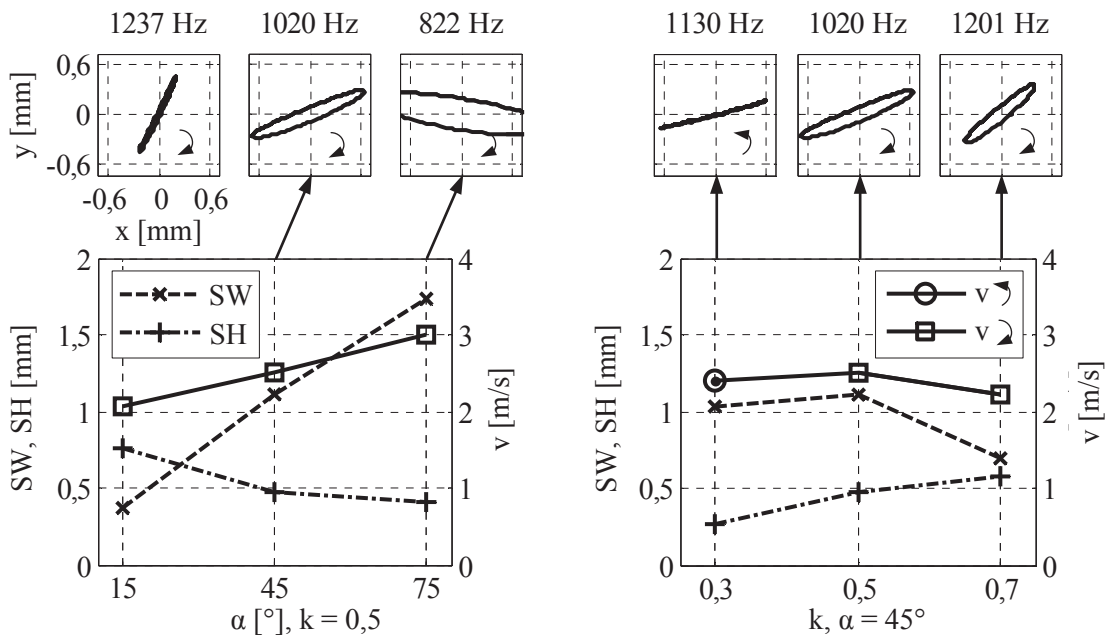


Abb. 5.20: Geometrieabhängigkeit der Trajektorien bei einer Erregung mit 95 % der zweiten Eigenfrequenz  $f_{r2}$

## 5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb

Es zeigt sich, dass der Wert der zweiten Eigenfrequenz des Balkens mit konstanter Länge  $L = L_1 + L_2$  abhängig der Teillängen  $L_1$  und  $L_2$  der Balkenabschnitte und des Winkels  $\alpha$  ist. Die Höhe, Breite, Geschwindigkeit und Umlaufrichtung der Trajektorien wird von der Balkengeometrie beeinflusst. Ein großer Winkel  $\alpha$  führt für die zweite Eigenform zu einer großen Trajektorienbreite  $SW$  und einer hohen Umlaufgeschwindigkeit  $v$ .

### 5.3.5 Experimentelle Betrachtung der erzwungenen Schwingungen von gekrümmten Balken

Wie in den numerischen Untersuchungen gezeigt wurde, führt die hochfrequente Erregung eines gekrümmten Balkens zu einer Überlagerung von horizontalen und vertikalen Bewegungen des Endpunktes in der Ebene. Es entstehen elliptische Trajektorien. In diesem Abschnitt wird der Nachweis der Bewegung des freien Endpunktes an realen Balken gegeben. Die im Allgemeinen betrachteten Systeme zeichnen sich durch hochfrequente Schwingungen,  $f > 500$  Hz, und Auslenkungen im Submillimeterbereich aus. Deshalb werden die experimentellen Untersuchungen an skalierten Ersatzsystemen bzw. mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops durchgeführt. Ziel ist nicht die Ermittlung quantitativer geometrischer Größen, sondern der qualitative Nachweis der Bewegung.

#### Untersuchung an einem skalierten Ersatzsystem

Das Ersatzsystem besteht aus einem Kupferdraht der Länge ( $L = 200$  mm,  $d = 0,5$  mm) der an einem piezoelektrischen Biegeaktor fixiert ist. Der Aktor ist mittig eingespannt und wird mit einer Wechselspannung angesteuert. Es werden zwei geometrische Formen untersucht:

- Gekrümmter Balken mit  $L_1 = 100$  mm,  $L_2 = 100$  mm,  $\alpha = 45^\circ$ , Tab. 5.7, und
- Kreisbogenförmiger Balken mit dem Krümmungsradius  $R = 170$  mm, Tab. 5.8.

Zur Ermittlung der Eigenfrequenzen wird die Frequenz der elektrischen Spannung kontinuierlich gesteigert bis die Amplitude der Auslenkung des Balkenendpunktes ein lokales Maximum erreicht. Der eingeschwingene Zustand wird mit einer Hochgeschwindigkeitskamera<sup>5</sup> gefilmt. Die Überlagerung von Einzelbildern der Videos werden in den folgenden Tabellen dargestellt. In den Abbildungen sind die Schwingungsknoten markiert.

Die Untersuchungsobjekte werden mithilfe der FE-Methode modelliert. Der Draht wird als einseitig eingespannt dargestellt. Durch eine Modalanalyse werden die Eigenfrequenzen und Eigenformen ermittelt und den experimentellen Ergebnissen in Tab. 5.7 und Tab. 5.8 gegenübergestellt.

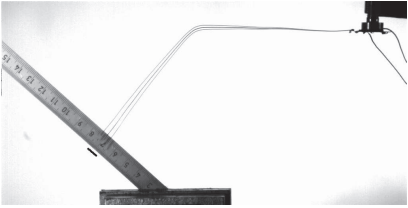
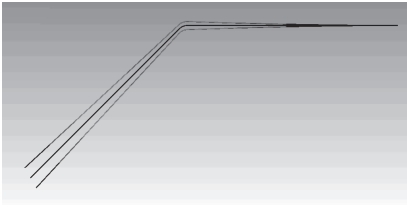
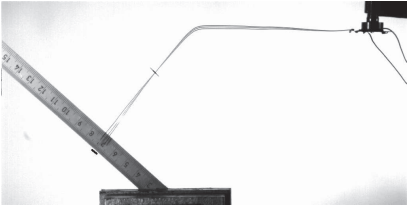
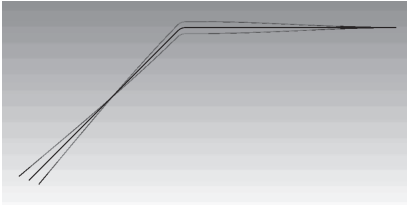
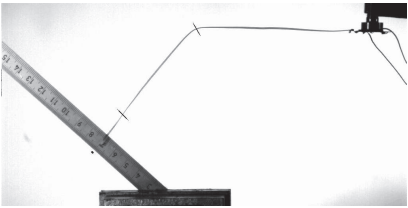
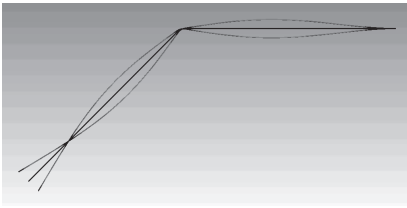
Die Betrachtungen der vorhergehenden Abschnitte können bestätigt werden. Die Erregung von erzwungenen Schwingungen führt frequenzabhängig zu unterschiedlichen Schwingungsformen und Trajektorien des freien Endpunktes. Höhe und Breite der Trajektorien können durch Änderung der Frequenz beeinflusst werden. Die zweite Eigenform der beiden Balkengeometrien resultiert in Trajektorien mit großem horizontalen Anteil. Die experimentell ermittelten Resonanzfrequenzen werden durch die FE-Modalanalysen bestätigt. Die Abweichungen  $\Delta f$  liegen im Bereich von 8 % bis 15 %.

<sup>5</sup>Modell der Kamera: HCC-1000, Hersteller: VDS Vosskühler GmbH, Deutschland

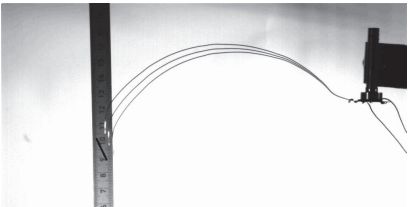
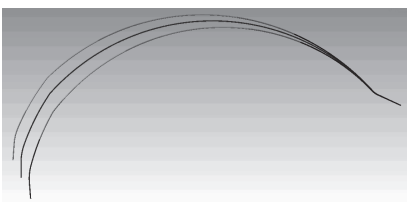
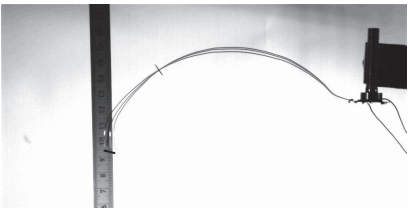
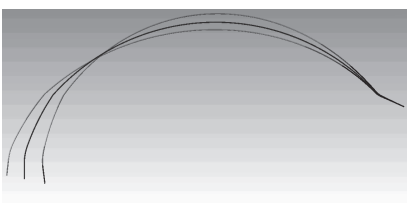


### 5.3 Dynamische Untersuchung der Übertragungselemente

**Tab. 5.7:** Eigenformen und Eigenfrequenzen eines gekrümmten Balkens

Nr.	Experiment	$\Delta f$	Simulation
1	 6,6 Hz	8 %	 7,2 Hz
2	 28,6 Hz	15 %	 33,7 Hz
3	 103,5 Hz	12 %	 117,9 Hz

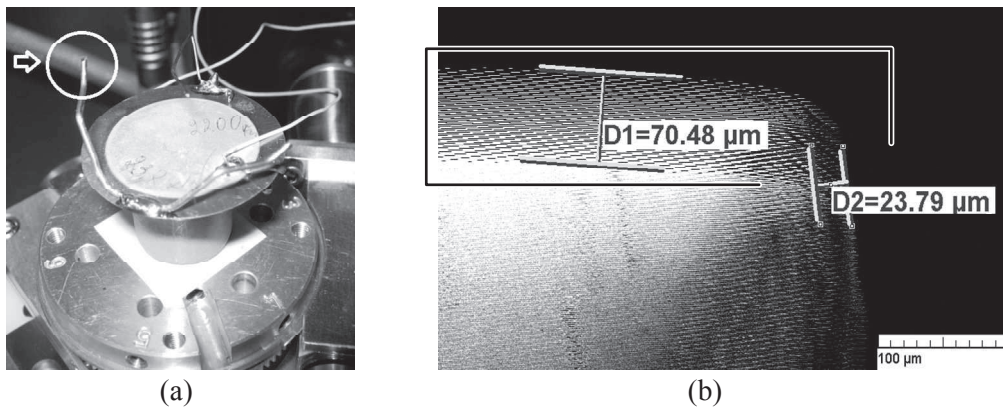
**Tab. 5.8:** Eigenformen und Eigenfrequenzen eines kreisbogenförmigen Balkens

Nr.	Experiment	$\Delta f$	Simulation
1	 6,6 Hz	10 %	 7,3 Hz
2	 26,6 Hz	10 %	 29,4 Hz

### Untersuchungen an einem System gleicher Größenordnung

Zum Nachweis der Schwingung des freien Endpunktes in vertikaler und horizontaler Richtung an einem System der gleichen Größenordnung, wie die im Weiteren beschriebenen Roboter, wird ein Rasterelektronenmikroskop<sup>6</sup> verwendet. Als Versuchsobjekt dient ein piezoelektrischer Biegeaktor mit daran fixierten gekrümmten Balken aus Stahldraht ( $L = 30$  mm). Für die Aufnahmen wird auf den Endpunkt des in Abb. 5.21 (a) markierten Balkens fokussiert. In Abb. 5.21 (b) ist eine Überlagerung zweier mit dem Mikroskop erstellten Aufnahmen gegeben. Der durchgehende und helle Teil der Darstellung stellt den Endpunkt in Ruhe dar. Der eingerahmte Teil der Abbildung zeigt eine Momentaufnahme des bewegten Endpunktes für die Schwingung mit einer Frequenz von 2200 Hz. Mit dem Mikroskop können Aufnahmen im zeitlichen Abstand von drei Sekunden gemacht werden. Die eingezeichneten Abmessungen der horizontalen und vertikalen Schwingung markieren damit nicht zwangsläufig die maximalen Amplituden.

Die Bewegung des Endpunktes in verschiedenen Raumrichtung wird deutlich.



**Abb. 5.21:** Nachweis der Bewegung des freien Endpunktes mit einem Rasterelektronenmikroskop: (a) - Experimenteller Aufbau; (b) - Überlagerte Aufnahme des Endpunktes in Ruhe und bei einer Erregungsfrequenz von 2200 Hz

<sup>6</sup>Modell des Mikroskops: TESCAN VEGA SB, Hersteller: TESCAN Brno, s.r.o, Tschechien

### 5.3.6 Ausblick zur Anwendung der Übertragungselemente in mobilen Robotern

In diesem Abschnitt wurde das Schwingungsverhalten von geraden und gekrümmten Balken untersucht. Der Fokus wurde auf den Effekt der Resonanz gelegt. Balken sind für die Anwendung als Übertragungselemente in vibrationsgetriebenen Robotern geeignet. Sie können die innere periodische Erregung verstärken. Ihr frequenzabhängiges Schwingungsverhalten kann genutzt werden, um durch die Änderung der Antriebsfrequenz eine steuerbare Lokomotion zu erzeugen. Die steuerbaren Trajektorien des freien Endpunktes eines gekrümmten Balkens sind ein Indiz dafür.

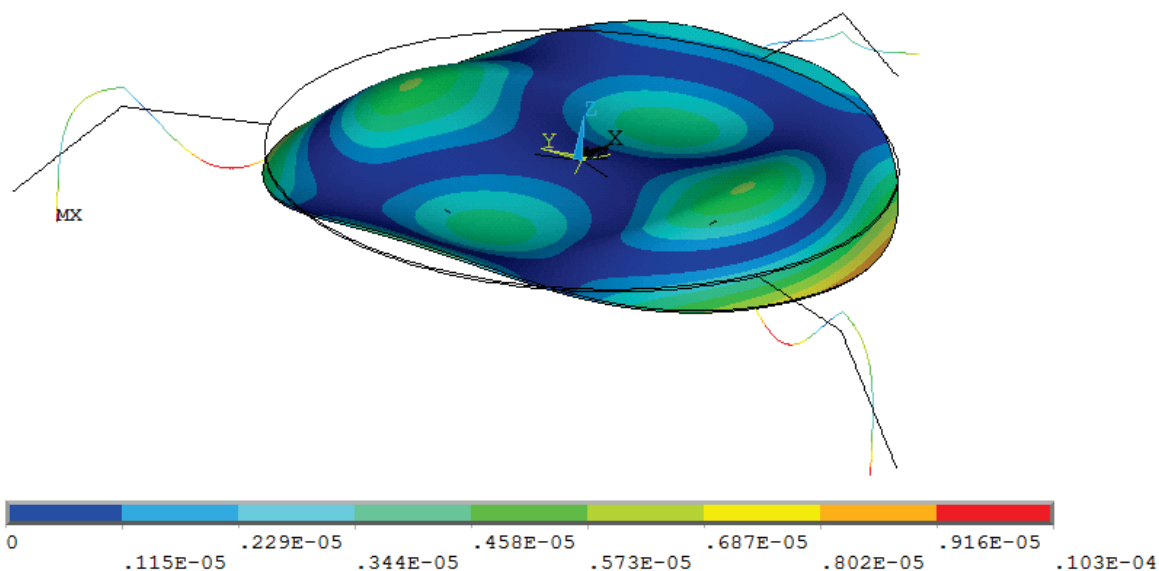
Das Schwingungsverhalten ist abhängig von Material, Geometrie und Randbedingungen. Besonders gekrümmte Balken besitzen Potential für die Anwendung in vibrationsgetriebenen mobilen Robotern, siehe Abschnitt 3.2: [DA97], [Sni08], [I-S08], [Li11]. Eigenfrequenzen von geraden und gekrümmten Balken unterscheiden sich nur geringfügig. Für die frequenzbezogene Dimensionierung können Abschätzungen am geraden Balken benutzt werden.

## 5.4 Gesamtsystem aus Antriebselement und Übertragungselementen

Für mobile Roboter, die durch nur einen periodischen Antrieb eine steuerbare zweidimensionale Bewegung realisieren, ist es notwendig, dass eine kontrollierte Beeinflussung des Antriebs eine bewegungswirksame Änderung der Systemeigenschaften erzeugt. Diese Bedingung wird durch die Verbindung der besprochenen Aktoren und Übertragungselemente erfüllt.

### 5.4.1 Aufbau des Gesamtsystems und des FE-Modells

Für die Untersuchungen werden Aktoren, wie sie in Abschnitt 5.2 beschrieben wurden, verwendet. Ihre Parameter sind in Tab. 5.2 genannt. Für die FE-Simulationen der Piezokeramik werden die Kennwerte aus Tab. A.2 benutzt. Als Übertragungselemente werden Kupferdrähte mit kreisrundem Querschnitt und den Materialparametern aus Tab. 5.4 verwendet. Das Gesamtsystem, siehe Abb. 5.22, wird in verschiedenen Konfigurationen untersucht, die sich im Wesentlichen durch die Geometrie der Übertragungselemente unterscheiden. Zur manuellen Fertigung des Gesamtsystems werden die Kupferdrähte durch Kleben oder Lötten am äußeren Rand des Aktors befestigt. Sie schließen einen Winkel von jeweils  $120^\circ$  ein. Die Enden der gekrümmten Drähte bilden die drei Kontaktpunkte zum Untergrund aus Glas oder Aluminium. Sie werden durch den Aktor zu Schwingungen angeregt und erzeugen an den Kontaktstellen zum Untergrund die bewegungswirksamen Kräfte. Somit erfüllen sie die Funktionen eines Übertragungs- und Wirkelements und werden im Folgenden als Beine bezeichnet. Fotografien der betrachteten Systeme sind in Abb. 5.1 und Abb. 5.26 dargestellt.



**Abb. 5.22:** Schwingungsform des FE-Modells für  $f = 2690$  Hz und  $U = 24$  V als Ergebnis einer FE-Frequenzganganalyse; Werte der Farbskala in Meter

## 5.4 Gesamtsystem aus Antriebselement und Übertragungselementen

Für die numerischen Berechnungen des Gesamtsystems werden die zuvor betrachteten Modelle kombiniert. Das System umfasst *BEAM188*-, *SOLID5*- und *SOLID185*-Elemente. Die Verbindung der Elemente wird durch die Kopplung der Freiheitsgrade ihrer überlappenden Knoten realisiert. Für das gesamte Modell wird frequenzunabhängig ein Dämpfungsgrad von  $D = 0,005$  vorgegeben. Dies ist ein realitätsnaher Wert für metallische Werkstoffe [Ste08], [Dre09].

Im Gegensatz zum experimentellen System, wird der Antrieb als mittig eingespannt modelliert. Die Beinenden sind frei. Es wird eine Frequenzganganalyse des FE-Modells durchgeführt. Als Erregung wird ein periodisches Wechsellspannungssignal von 24 V auf das Piezomodell angewendet. Eine beispielhafte Schwingungsform des FE-Modells ist in Abb. 5.22 dargestellt. Die beiden vorderen Beine besitzen identische Eigenschaften ( $L_1 = 12$  mm,  $L_2 = 12$  mm,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $d = 0,25$  mm) und schwingen in einer Form, die ähnlich der dritten Eigenform des einseitig eingespannten, gekrümmten Balkens ist. Das hintere Bein hat den doppelten Durchmesser  $d = 0,5$  mm, aber ansonsten die gleiche geometrische Form. Es wird für diese Frequenz weniger stark erregt. Weitere Ergebnisse der FE-Simulationen werden in Abb. 5.24 gegeben.

### 5.4.2 Messaufbau und Digitalisierung

Zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens wird das Experimentalsystem, siehe Abb. 5.1, durch eine Wechsellspannung mit einer Amplitude von 24 V zum Schwingen angeregt. Die Bewegungsbahn wird durch eine senkrecht über der Versuchsanordnung positionierten Videokamera verfolgt. Aus einem Video wird computergestützt unter Verwendung der „OpenSource“-Software *Tracker 4.86*<sup>7</sup> die Bahn bestimmt, indem die Positionen der beiden Markierungen auf einem Roboter, siehe Abb. 5.23, Bild für Bild ermittelt und gespeichert werden. Die Umrechnung der Position von Pixeln in Millimeter erfolgt anhand eines Vergleichsmaßstabes.

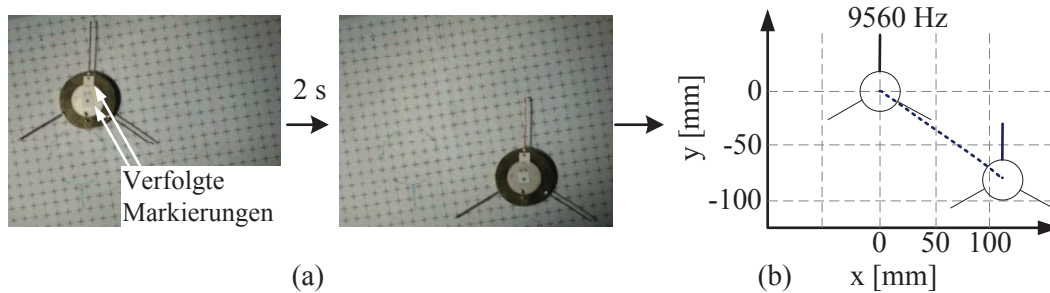
In Abb. 5.23 wird die Digitalisierung der Roboterbewegung illustriert. Sie zeigt Anfangs- und Endposition des Roboters nach einer Bewegungszeit von zwei Sekunden. Anfangsposition bedeutet nicht, dass der Roboter sich in Ruhe befand, sondern benennt die Position, die der sich bewegende Roboter zu Anfang des Videos hat. Zur Orientierung ist ein Bein fett gekennzeichnet. Die Änderung der Orientierung des Systems kann daran nachvollzogen werden.

Die Roboter bewegen sich meist auf krummlinigen Bahnen und drehen sich um ihre vertikale Achse. Die dokumentierten Geschwindigkeiten  $v$  entsprechen der zurückgelegten Bogenlänge pro Zeit. Als Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  wird die Drehung des Roboters um die Vertikale pro Zeit bezeichnet. Alle nachfolgenden Abbildungen beziehen sich auf eine Bewegungszeit von zwei Sekunden.

---

<sup>7</sup> GNU General Public License Version 3

## 5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb



**Abb. 5.23:** Illustration des Vorgehens für die Bewegungsanalyse: (a) - Einzelbilder einer Videosequenz von Anfangs- und Endposition nach 2 s; (b) - Digitalisierter Bewegungsverlauf mit eingezeichneter Trajektorie des Mittelpunktes

### 5.4.3 Untersuchung der Bewegung des Gesamtsystems

#### Steuerbarkeit und Vergleich von FE-Simulation und Experiment

Das Bewegungsverhalten wird von den frequenzabhängigen Schwingungseigenschaften des elastischen Gesamtsystems aus Antriebselement und Übertragungselementen beeinflusst.

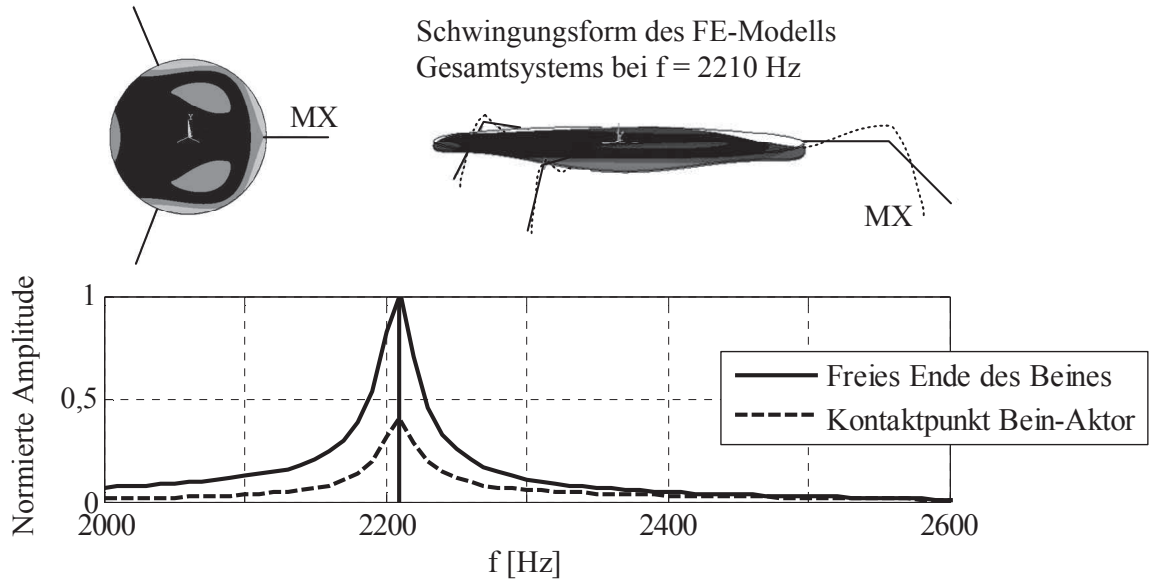
Ein experimenteller Nachweis der frequenzabhängigen Steuerbarkeit der Lokomotion wird in Abb. 5.24 gegeben. Dargestellt ist das Bewegungsverhalten des Systems für eine Antriebsfrequenz zwischen 2000 Hz und 2600 Hz. Die gewählte Bandbreite entspricht einem Bereich von  $\pm 10\%$  um die zweite Eigenfrequenz  $f_{r2} = 2335$  Hz eines einseitig eingespannten Balkens mit den Geometrie- und Materialeigenschaften eines Beins. In der Abbildung wird die Frequenzabhängigkeit von Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit gezeigt. Pfeile verdeutlichen die Bewegungsrichtung des Systems und den Drehsinn. Lokale Extremwerte von  $v$  und  $\omega$  liegen bei 2190 Hz.

Die FE-basierte Frequenzganganalyse des Gesamtsystems zeigt die maximale Auslenkung eines Beinendpunktes in der Nähe des Geschwindigkeitsmaximums der Experimentalsystems bei 2210 Hz. In Abb. 5.24 ist die zugehörige Schwingungsform dargestellt. FE-Analysen können, trotz der hier unterschiedlichen Randbedingungen, durch die Bestimmung des Schwingungsverhaltens und die Ermittlung der Lage von Resonanzstellen wichtige Ergebnisse für die Gestaltung realer Prototypen liefern.

#### Reproduzierbarkeit der Bewegung

Grundvoraussetzung für steuerbare mobile Roboter ist die Reproduzierbarkeit ihres Bewegungsverhaltens. Dies ist für die betrachteten Systeme in guter Näherung gewährleistet. In Abb. 5.25 werden die Endpositionen eines Systems für zwei Erregungsfrequenzen dargestellt. Pro Frequenz werden drei Messungen durchgeführt. Die Anfangsposition und Orientierung des Systems wird für jede Messung variiert. Dadurch wird ausgeschlossen, dass die Bewegung wesentlich durch richtungsabhängige Eigenschaften des Glasuntergrundes, Verschmutzungen oder Neigungen bestimmt wird.

FE-Frequenzganganalyse



Experimentelle Bewegungsmessungen

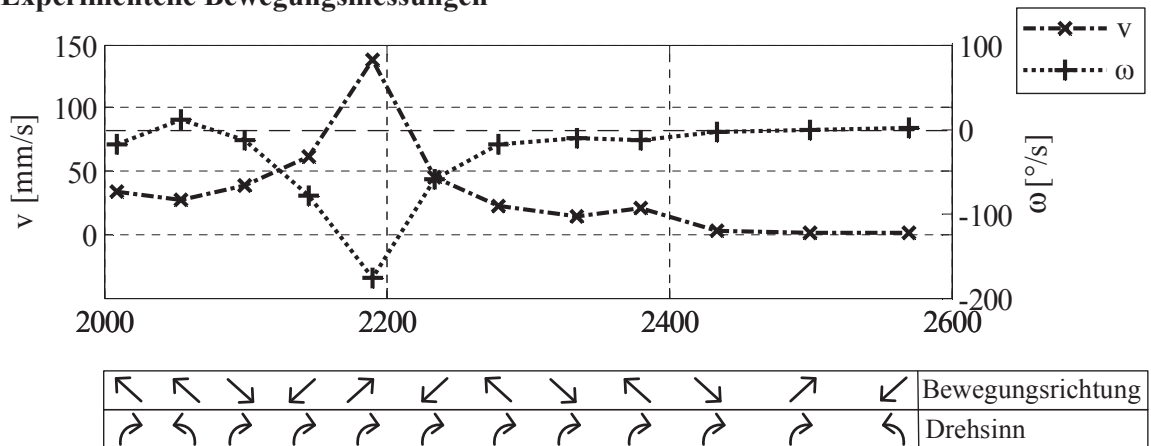


Abb. 5.24: Vergleich von FE-Simulationen und dem Bewegungsverhalten eines Gesamtsystems; Beinparameter:  $L_1 = 12$  mm,  $L_2 = 12$  mm,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $d = 0,5$  mm



## 5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb

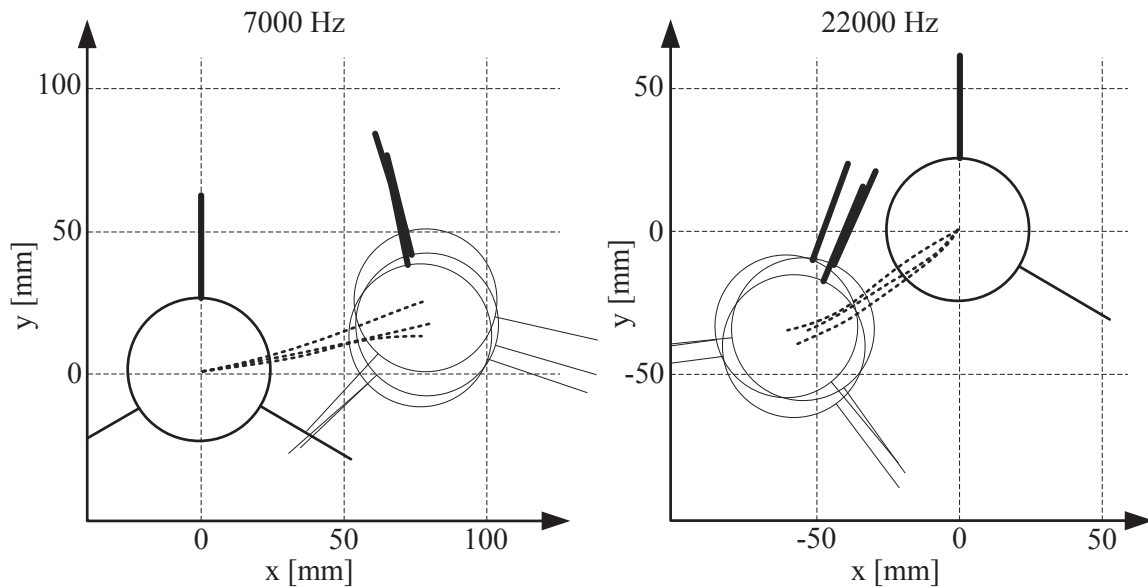


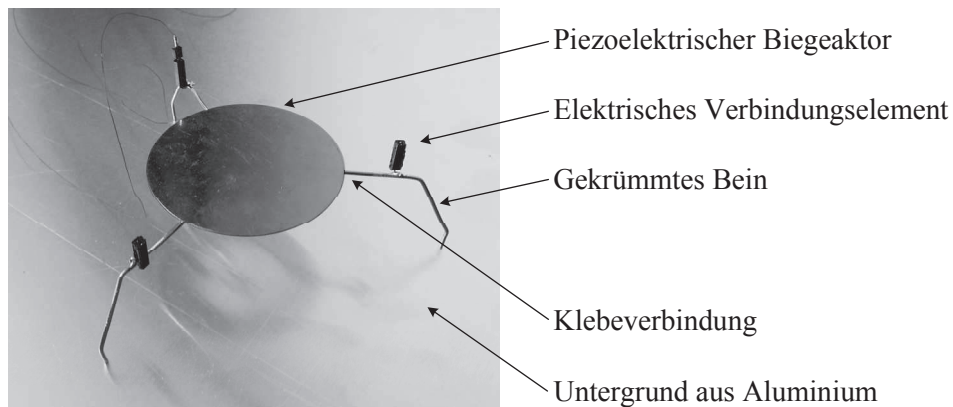
Abb. 5.25: Reproduzierbarkeit der Roboterbewegung

### Kontaktverlust eines Roboters zum Untergrund

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Kontaktverlust des Roboters vom Untergrund und dem Bewegungsverhalten wird der folgende experimentelle Aufbau verwendet. Das Versuchsobjekt ist in Abb. 5.26 dargestellt. Im Unterschied zu den bisherigen Robotern sind Beine und Aktor durch Kleben verbunden, wodurch eine galvanische Trennung der Kupferbeine und Messingplatte realisiert wird. Als Untergrund dient eine Platte aus Aluminium. Die Beine besitzen elektrische Anschlüsse. An Bein und Untergrund wird eine Gleichspannung angelegt und der Stromfluss, über einen in Reihe geschalteten Messwiderstand von 100 k $\Omega$ , mit einem Oszilloskop verfolgt. Bei Kontaktverlust fällt die Spannung auf null ab. Am Piezoaktor wird eine Wechselspannung angelegt und in Schritten von 1 Hz gesteigert.

Ab einer Frequenz von 70 Hz kommt es zu einer ungerichteten und chaotischen Bewegung des Roboters, ohne dass der Stromfluss unterbrochen wird. Ab 100 Hz kann das Abheben der Beine und eine gerichtete Bewegung beobachtet werden. Für das betrachtete System kann Lokomotion nur bei periodischem Kontaktverlust erzeugt werden.





**Abb. 5.26:** Versuchsobjekt für den Kontaktverlust eines Roboters

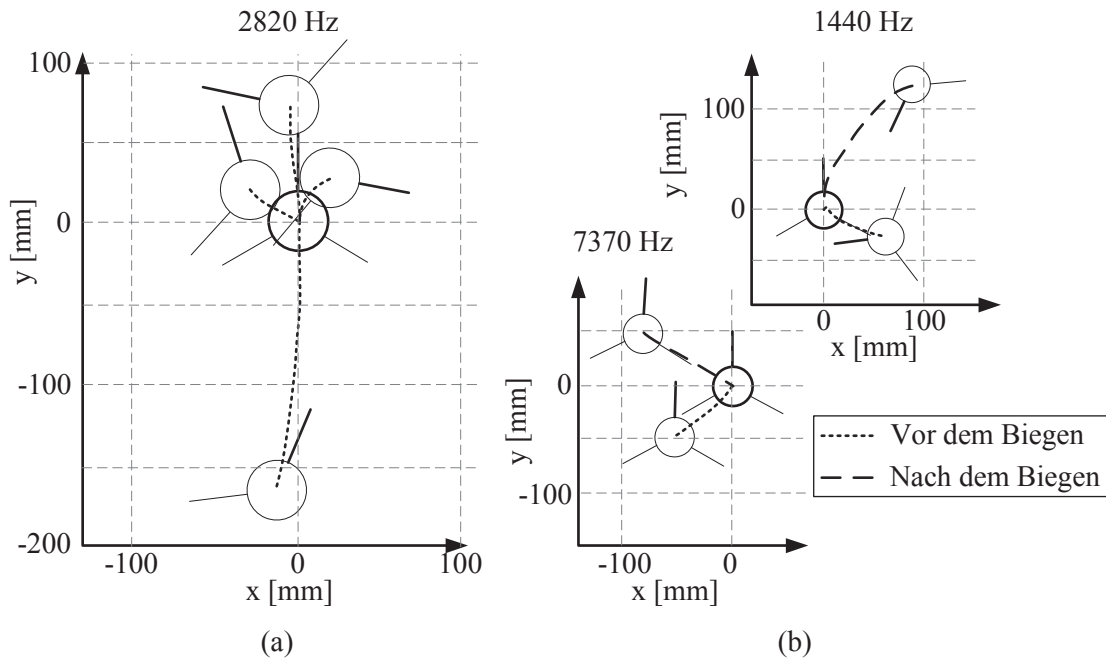
### **Einfluss der Fertigung der Systeme**

Der Einfluss der Fertigung der Systeme auf das Bewegungsverhalten wird untersucht. Dazu werden manuell vier baugleiche Roboter hergestellt. In Abb. 5.27 (a) ist das Bewegungsverhalten für die Roboter unter gleichen Umgebungsbedingungen und Ansteuerungsparametern dargestellt. Es zeigen sich deutliche Unterschiede, die neben der beschriebenen Ungleichheit der Aktoren auch auf die manuelle Fertigung der Systeme zurückzuführen sind. Schon geringe Änderungen der mechanischen Eigenschaften der Systeme haben einen wesentlichen Einfluss auf die Bewegung.

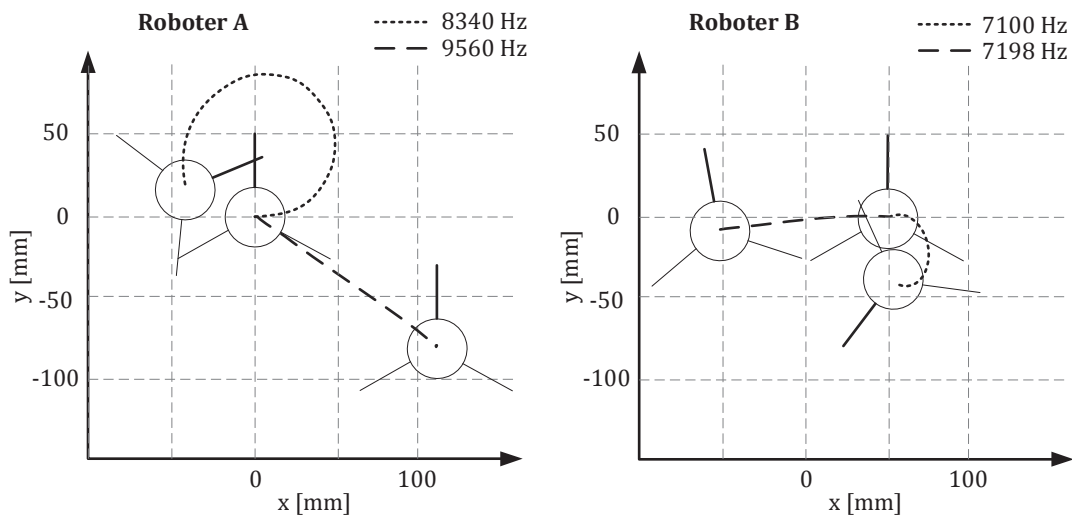
In Abb. 5.27 (b) werden die Bahnen eines einzigen Roboters dargestellt: im „Ausgangszustand“ und nachdem die Beine stark verbogen und wieder gerade gebogen wurden. Trotz der Verwendung des identischen Aktors und augenscheinlich gleicher Beingeometrie unterscheidet sich das Bewegungsverhalten deutlich. Ähnliche Einflüsse werden in [Sni08] beschrieben.

Die Erzeugung eines allein durch die Gestalt vordefinierten Bewegungsverhaltens ist mit den verwendeten Aktoren und Fertigungsmethoden nicht möglich.

5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb



**Abb. 5.27:** Vergleich der Bewegung augenscheinlich gleicher Roboter: (a) - Vier Roboter gleicher manueller Bauart; (b) - Ein Roboter mit geometrisch gleichen Beinen im Ausgangszustand und nach einer plastischen Verformung durch Biegen und Rückbiegen



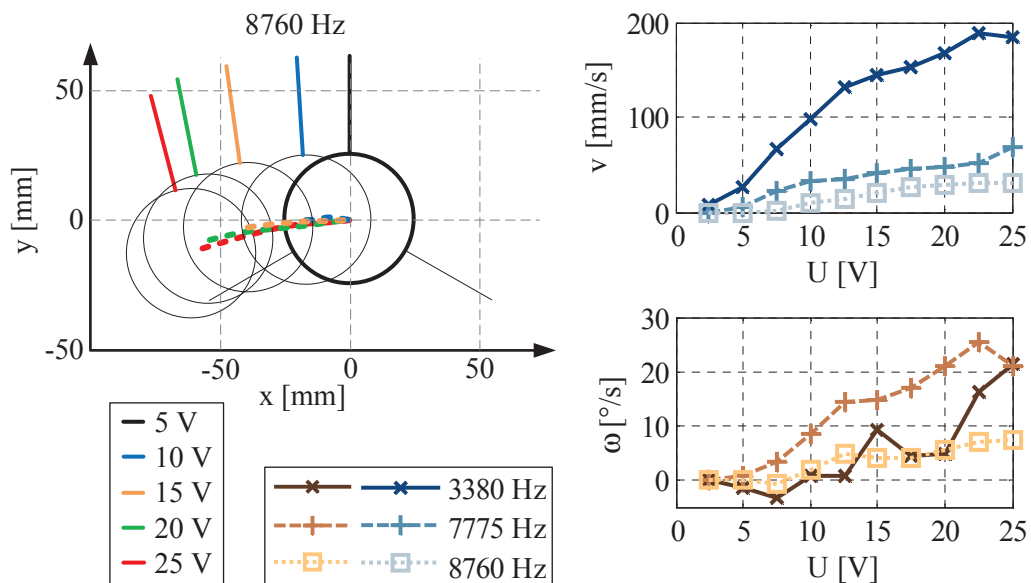
**Abb. 5.28:** Bewegungen eines Roboters mit nahezu reiner Translation bzw. Rotation

### Erzeugung definierter Trajektorien

Für eine einfache Bewegungsplanung ist es von Vorteil, wenn geradlinige Bahnen und reine Rotationen um die vertikale Mittelachse des Systems möglich sind. Frequenzen, die zu praktisch reinen Translationen führen, konnten für alle untersuchten Roboter gefunden werden. Reine Rotationen konnten nicht beobachtet werden. Jedoch ist es möglich eine Rotation mit nur geringem translatorischen Anteil zu erzeugen. Gering heißt in diesem Zusammenhang, dass die Mittelpunktposition des Roboters nach einer vollen Umdrehung sich nicht mehr als 50 mm geändert hat. Beispiele sind in Abb. 5.28 dargestellt.

### Einfluss der Amplitude der Ansteuerungsspannung

Bei gleichbleibender Ansteuerungsfrequenz führt eine Steigerung der Amplitude der elektrischen Spannung im Allgemeinen zu einem Anstieg der Geschwindigkeit  $v$  und Rotationsgeschwindigkeit  $\omega$  der betrachteten Roboter. Die Bewegungsrichtung ist weitgehend unabhängig von der Spannungsamplitude  $U$ , wie in Abb. 5.29 dargestellt wird.



**Abb. 5.29:** Bewegungen des Gesamtsystems, siehe Abb. 5.1, und Verlauf der Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit der elektrischen Spannungsamplitude

## 5.5 Programmierbarer, fernsteuerbarer Prototyp „Beetle-Robot“

Basierend auf den vorhergehenden Betrachtungen wird ein mobiler Roboter mit hochfrequentem Antrieb entwickelt. Mit nur einem Aktor, der durch ein Wechselnungssignal mit einstellbarer Frequenz angesteuert wird, kann eine steuerbare zweidimensionale Bewegung erzeugt werden.

### 5.5.1 Aufbau und Funktionsweise des „Beetle-Robot“

Der Prototyp besteht, wie in Abb. 5.30 dargestellt, aus drei Grundeinheiten: dem Informationsverarbeitungssystem mit Leistungselektronik, der Energieversorgung und dem Vibrationssystem. Den Roboter charakterisierende Zahlenwerte sind in Tab. 5.9 gegeben. Zur Ermittlung von Antriebs- und Haftreibungskraft wird das Messsystem in Anhang A.2 verwendet.

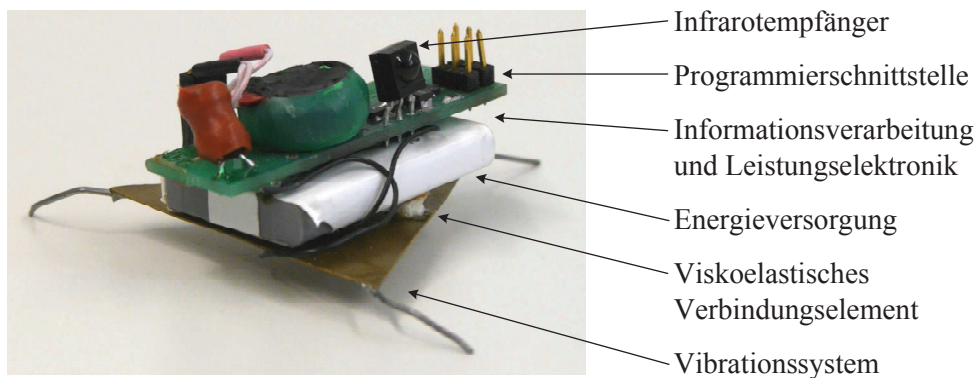


Abb. 5.30: Prototyp „Beetle-Robot“ [Bec12]

Das Vibrationssystem besteht aus einem runden piezoelektrischen Biegeaktor, der auf einer dreieckigen Messingplatte mit einer Höhe von 0,5 mm durch Kleben befestigt ist. Die Grundseite des gleichschenkligen Dreiecks hat die Länge 50 mm. Die Symmetrieachse ist 50 mm lang. An den Ecken der Platte sind gekrümmte Stahldrähte als Beine durch Lötten befestigt. Sie haben eine Länge von 20 mm und einen Durchmesser von 0,9 mm.

Als Energieversorgung dient ein Lithium-Ionen-Akku. Er ist mit drei viskoelastischen Elementen aus Schaumstoff mit dem Vibrationssystem verbunden und besitzt eine starre Verbindung zur Leiterplatte. Auf der Leiterplatte befinden sich eine Schnittstelle zum Laden des Akkus, eine serielle Schnittstelle zur Programmierung über USB und der Infrarot-Empfänger als Schnittstelle zu einer Fernbedienung, mit der das System programmiert und ferngesteuert werden kann. Auf dem internen Speicher können zehn Frequenzen abgelegt und durch die Fernbedienung beliebig lang erregt werden. Eine weitere Möglichkeit ist es, die gespeicherten Frequenzen für programmierbare Zeitspannen sequentiell zu verknüpfen und als Ablaufplan zu speichern. Somit kann der Roboter erstellte Bewegungsmuster abfahren. Die digital gespeicherten Frequenzen werden durch eine elektronische Schaltung in ein Wechselnungssignal einer Amplitude von 20 V gewandelt und zum Antriebselement übertragen.

## 5.5 Programmierbarer, fernsteuerbarer Prototyp „Beetle-Robot“

Im Vergleich zu den Anordnungen aus Piezoaktor mit direkt daran befestigten Beinen, besitzt das Vibrationssystem des „Beetle-Robot“ eine deutlich höhere Steifigkeit, wodurch eine Erhöhung der Tragfähigkeit erzielt wird. Zusatzmassen von bis zu 150 g können transportiert werden. Das entspricht einer Traglast im Bereich des Fünffachen des Eigengewichts.

**Tab. 5.9:** Charakteristische Parameter des „Beetle-Robot“

Länge x Breite x Höhe	$L \times B \times H$	$69 \times 80 \times 30$	$\text{mm}^3$
Masse	$m_R$	31,7	g
Erregungsfrequenzband	$f$	1...70	kHz
Spannungsamplitude	$U$	20	V
Haftreibung	$F_R$	$\approx 120$	N
Antriebskraft	$F_A - F_W$	$\approx 12,5$	N

Wie in den bisher besprochenen Lokomotionssystemen, werden zur Erzeugung der Fortbewegung hochfrequente Schwingungen benutzt. Die Bewegungsrichtung wird durch die Erregungsfrequenz des Antriebs gesteuert. Durch die elektrische Wechselspannung wird das Vibrationssystem zu hochfrequenten Biegeschwingungen erregt. An den drei Kontaktpunkten zum Untergrund werden durch trockene Reibung die Antriebskräfte übertragen. Im Vergleich zu den bisher besprochenen Systemen hat die unsymmetrische Massenverteilung des Systems einen zusätzlichen Einfluss auf das Bewegungsverhalten.

### 5.5.2 Bewegungsstudien mit dem „Beetle-Robot“

Mit Blick auf mögliche Anwendungsfelder des Prototypen als Transport- oder Inspektionssystem werden die Bewegungsstudien in Abhängigkeit von Frequenz, Zusatzmasse und Untergrund durchgeführt. Realisierung und Digitalisierung der Messung erfolgen, wie in Abschnitt 5.4 beschrieben.

#### **Einfluss von Zusatzmassen**

Der Prototyp wird mit Zusatzmassen im Bereich von 10 g bis 100 g beschwert und mit einer Frequenz zwischen 100 Hz und 70 kHz angesteuert. Als Untergrund dient eine Glasplatte, siehe Tab. 5.10. Die Zusatzmasse wird über dem Schwerpunkt des Roboters angebracht, um eine gleichmäßige Verteilung der Normalkraft auf die drei Beine zu erreichen. Neben der Gesamtmasse wird dadurch auch das Massenträgheitsmoment, die Schwingungseigenschaften, die Reibungskraft und erzeugbare Antriebskraft beeinflusst. Die Ergebnisse sind in Abb. 5.31 dargestellt.

Tendenziell lässt sich aus Abb. 5.31, besonders beim Vergleich der roten (Zusatzmasse von 100 g) und der hellblauen Kurve (keine Zusatzmasse), ablesen, dass schwerere Systeme sich langsamer bewegen, als leichtere. Diese Tendenz lässt sich nicht verallgemeinern. Durch die Verschiebung der Resonanzstellen bei Anbringung der Zusatzmasse entstehen für die gleiche Erregungsfrequenz unterschiedliche Schwingungsformen. Entsprechend ist die Lage der lokalen Maximalwerte der Geschwindigkeits- und Winkelgeschwindigkeitsverläufe massen- und frequenzabhängig.

## 5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb

Für drei beispielhafte Frequenzwerte sind die Anfangs- und Endpositionen der Roboter mit verschiedenen Zusatzmassen in Abb. 5.31 dargestellt. In den Bewegungsverläufen für 40 kHz und 55 kHz ist die Veränderung der Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit bei Massenanbringung erkennbar, ohne dass sich jedoch eine klare Richtung der Veränderung erkennen lässt. Alle Roboterkonfigurationen bewegen sich aber mit vergleichsweise hohen Geschwindigkeiten für diese Erregungsfrequenzen. Bemerkenswert ist das Verhalten bei 66,3 kHz. Alle Roboterkonfigurationen bewegen sich in die gleiche Richtung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Frequenzen, die eine Steuerung der Bewegungsrichtung ermöglichen, die unabhängig der Zusatzmasse ist, sind von besonderem Interesse für eine praktische Anwendung der Roboter als Transportsysteme.

### Einfluss des Untergrundes

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Dynamik des Systems vom Untergrund werden eine Glasplatte, ein Aluminiumblech und eine mehrlagige, schnittfeste Arbeitsmatte<sup>8</sup> aus Kunststoff verwendet. Die Untergründe liegen auf einem massiven Labortisch flach auf. Im Hinblick des auf Reibstößen basierenden Fortbewegungsprinzips werden die in Tab. 5.10 gelisteten Untergrundeigenschaften ermittelt.

Die Endpunkte der Beine verlieren im Betrieb periodisch den Kontakt zur Oberfläche. Sie bewegen sich in horizontaler Richtung gleitend oder ohne Kontakt zum Untergrund. Die gemessene<sup>9</sup> Rauigkeit des Untergrund kann das Abstoßen begünstigen oder die horizontale Bewegung behindern.  $R_a$  ist der nach DIN EN ISO 4287:2010 genormte arithmetische Mittelrauwert und  $R_z$  die gemittelte Rautiefe.

Die Kennwerte der Rauigkeit und Reibung werden in verschiedene Richtungen gemessen. Sie sind richtungsunabhängig. Die Stoßzahl ist ein wichtiger Kennwert, da das Abprallen bei periodischen Sprüngen bzw. die Energieabsorption des Untergrundes beim Aufkommen von Bedeutung sind. Zur Abschätzung der Stoßzahl wird ein Fallversuch mit einer Stahlkugel mit  $D = 6$  mm durchgeführt und mit einer Highspeed-Kamera<sup>10</sup> gefilmt. Die Fall- und Abprallhöhen werden für drei Versuche am Computer vermessen.

**Tab. 5.10:** Parameter der in Abb. 5.32 verwendeten Untergründe

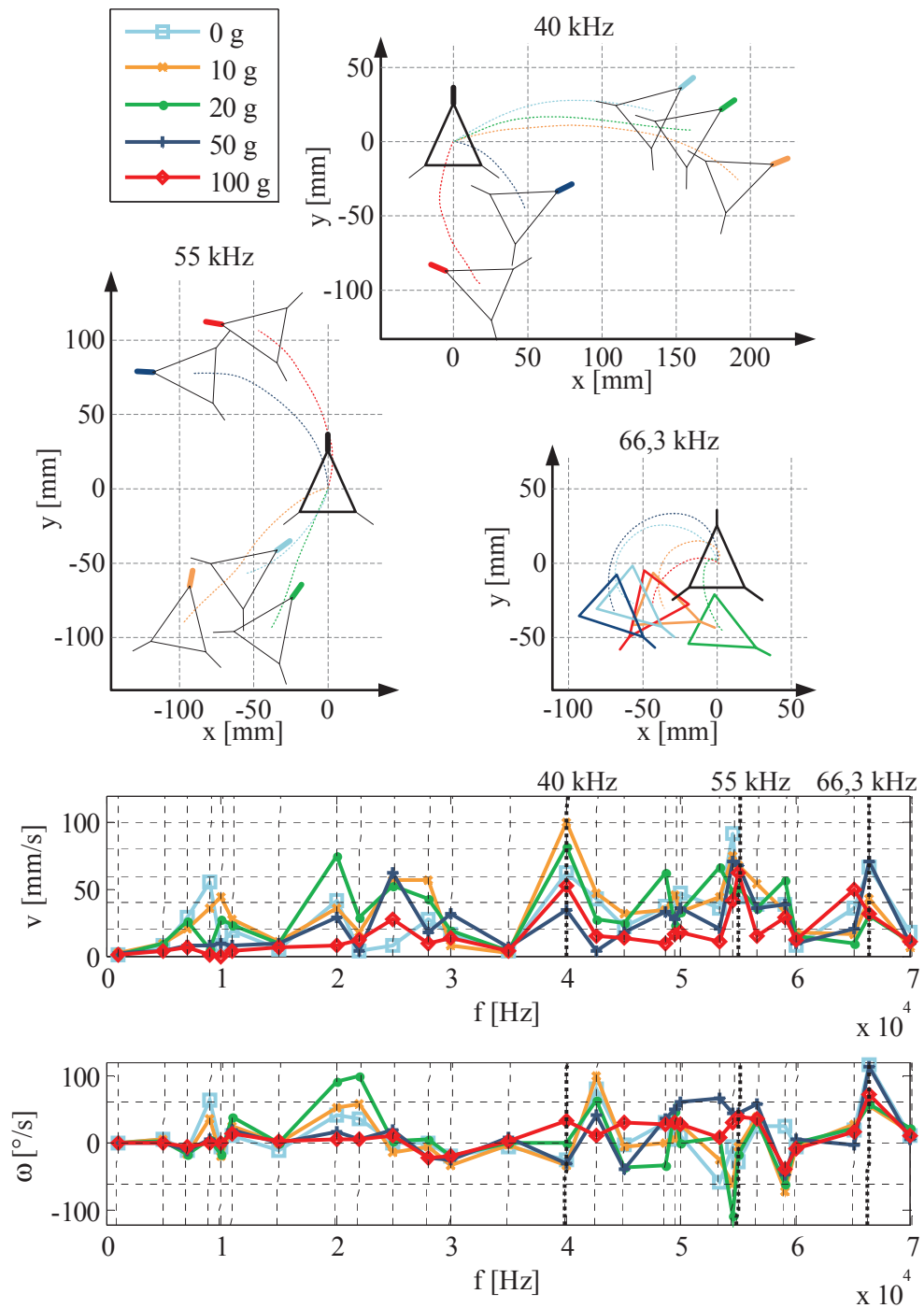
		Glas	Aluminium	Kunststoff	
Arithmetischer Mittelrauwert	$R_a$	0,02	0,34	5,04	$\mu\text{m}$
Gemittelte Rautiefe	$R_z$	0,1	1,7	35,3	$\mu\text{m}$
Haftreibungskoeffizient	$\mu_H$	0,15	0,55	0,50	
Gleitreibungskoeffizient	$\mu_G$	0,10	0,40	0,40	
Plattendicke	$h$	5	1	3	mm
Stoßzahl	$k$	0,74	0,34	0,57	

<sup>8</sup>Modell: CM-60 A2, Hersteller: Werner Dorsch GmbH, Deutschland

<sup>9</sup>Modell: Surtronic 3+, Hersteller: Taylor Hobson Ltd., England

<sup>10</sup>Modell: CR3000x2, Hersteller: Optronis GmbH, Deutschland, Aufnahmeparameter: 500 FPS

5.5 Programmierbarer, fernsteuerbarer Prototyp „Beetle-Robot“



**Abb. 5.31:** Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit des „Beetle-Robot“ in Abhängigkeit von Zusatzmasse und Frequenz und repräsentative Bewegungsverläufe



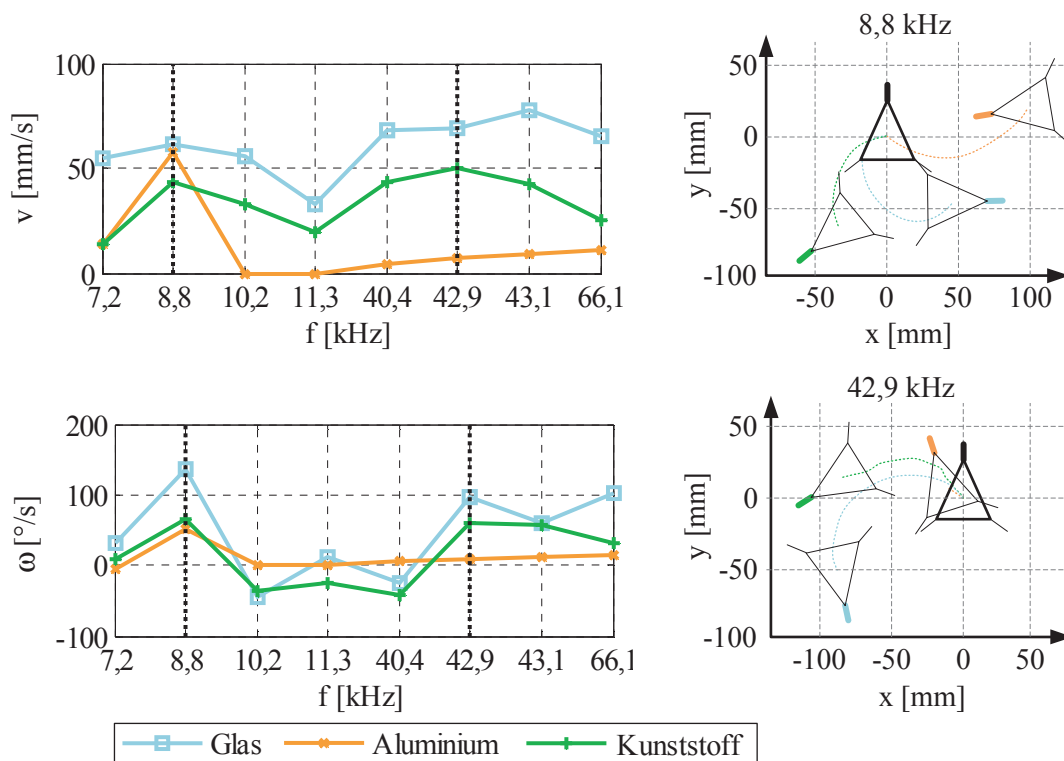
## 5 Terrestrische Roboter mit hochfrequentem Antrieb

Der Einfluss des Untergrundes auf die Bewegung kann in Abb. 5.32 nachvollzogen werden. Es werden lediglich Frequenzen untersucht, für die der Roboter sich auf der vergleichsweise rauen Kunststoffmatte fortbewegt. Für die meisten untersuchten Frequenzen kann darauf keine Lokomotion erzeugt werden.

Die größte Geschwindigkeit kann für alle Ansteuerungsfrequenzen auf Glas beobachtet werden. Von den verwendeten Untergründen besitzt Glas die geringsten Rauigkeits- und Reibungskoeffizienten und die größte Stoßzahl. Beim Vergleich der Lokomotion für 8,8 kHz und 42,9 kHz zeigen sich Unterschiede im Bewegungsverhalten. Bei einer Ansteuerung mit 8,8 kHz bewegt sich das System auf der Kunststoffmatte am langsamsten. Die Bewegung auf Aluminium und Kunststoff ist ungleichmäßig, was im Verlauf der Trajektorie des Mittelpunktes in Abb. 5.32 nachvollzogen werden kann. Die hohen Rautiefen beeinträchtigen das Schwingungsverhalten von mindestens einem der drei Beine.

Das Verhalten bei einer Ansteuerung mit  $f = 42,9$  kHz ist für die meisten untersuchten Fälle repräsentativ. Auf Aluminium bewegt sich das System am langsamsten. Hohe Energieverluste bei den Stoßvorgängen und durch die plastische Veränderung der Oberfläche durch Zerkratzen behindern die Bewegung. Auf der Kunststoffmatte bewegt sich das System schneller, trotz nahezu gleicher Reibungskoeffizienten, wie auf Aluminium.

Es zeigt sich, dass die Eigenschaften des Untergrundes die Lokomotion beeinflussen. Die Stoßzahl  $k$  und die Rautiefe  $R_z$  sind Kriterien, um die Eignung eines Untergrundes für eine schnelle Roboterbewegung zu bewerten.



**Abb. 5.32:** Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit des „Beetle-Robot“ auf verschiedenen Untergründen und repräsentative Bewegungsverläufe



## 5.6 Zusammenfassung terrestrischer Roboter mit hochfrequenten Antrieb

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass Roboter mit dem beschriebenen Bewegungsprinzip sehr hohe Geschwindigkeiten erreichen und für praktische Anwendungen benutzt werden können. Im Unterschied zu „klassischen Starrkörpersystemen“ kann eine steuerbare zweidimensionale Lokomotion durch einen einzigen periodischen Antrieb erzeugt werden.

Die Analyse des statischen und dynamischen Verhaltens von piezoelektrischen Biegeaktoren zeigte ihre Anwendbarkeit in mobilen Robotern für die Erregung von Schwingungen im betrachteten Frequenzbereich. Gerade und gekrümmte Balken können als Übertragungs- und Wirkelemente benutzt werden.

Die frequenzabhängige Steuerbarkeit der Bewegungsrichtung der Roboter konnte für verschiedene Systeme experimentell nachgewiesen werden. Der periodische Kontaktverlust der Beine des Systems ist für die Lokomotion von Bedeutung. Durch Erhöhung der Amplitude der Ansteuerungsspannung kann die Geschwindigkeit der Roboter gesteigert werden, ohne die Bewegungsrichtung stark zu beeinflussen. Für jedes der untersuchten Systeme konnten Frequenzen gefunden werden, die zu praktisch linearen Bewegungsbahnen führen. Sie sind von Vorteil für die Bewegungsplanung.

Die Bewegung der Systeme ist reproduzierbar. Ein im Voraus festgelegter Zusammenhang aus Ansteuerungsfrequenz und Bewegungsverhalten ist mit den hier verwendeten Aktoren und manuellen Fertigungsmethoden jedoch nicht möglich. Kleinste Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften der Systeme führen bei gleicher Frequenz zu völlig unterschiedlichen Bewegungseigenschaften. Beispiele sind die plastische Verformung der Übertragungselemente oder die unterschiedlichen Bewegungsbahnen von augenscheinlich baugleichen Robotern. Für ein definiertes Bewegungsverhalten ist ein Einlernprozess für jeden einzelnen Roboter notwendig, bei dem der Zusammenhang von Frequenz und Bewegung experimentell bestimmt wird. Diese Beziehungen sind abhängig von Untergrund und Zuladung.

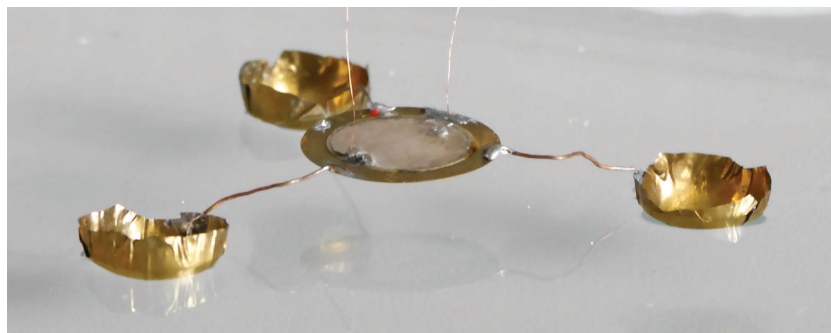
Eine vollständige Modellierung von Robotern ist, selbst wenn sie nur die wichtigsten bewegungsbeeinflussenden Effekte umfasst, außerordentlich umfangreich. Es zeigte sich jedoch, dass analytische Methoden sowie Modal- und Frequenzgang-Analysen an verhältnismäßig einfachen FE-Modellen für eine Abschätzung von Frequenzen, die zu starken Bewegungen führen, dienen können.



## 6 Prototyp für die amphibische Lokomotion

Im Stand der Technik wurden mobile Roboter behandelt, die aquatische vibrationsgetriebene Lokomotionsprinzipien realisieren. Es ist jedoch kein System bekannt, das nur einen Aktor besitzt und durch ein einziges Signal zweidimensional gesteuert werden kann. Auf Basis der Untersuchungen in den Kapiteln 2 und 5 und der in Tab. 1.1 formulierten Randbedingungen der Arbeit wurde ein solcher Roboter für terrestrische und aquatische Lokomotion entwickelt.

In Abb. 6.1 ist der amphibische Prototyp dargestellt. Er besteht aus einem piezoelektrischen Biegeaktor, drei Beinen aus Kupferdraht und drei Halbschalen aus Messingfolie. Diese Halbschalen dienen als Schwimmkörper und Wirkelemente. Sie erzeugen die Gegenkräfte zur Gewichtskraft des Roboters und die Antriebskräfte bezüglich der Flüssigkeit. Aktor, Beine und Schwimmkörper sind durch Löten fest miteinander verbunden. Der Aktor wird durch eine extern erzeugte Wechselspannung mit einer Amplitude von 24 V betrieben. Die Steuerbarkeit des Systems wird durch die frequenzabhängigen Schwingungseigenschaften des elastischen Gesamtsystems erreicht. Charakteristische Daten des Prototyps und der Flüssigkeit Wasser sind in Tab. 6.1 aufgelistet.



**Abb. 6.1:** Prototyp eines vibrationsgetriebenen amphibischen Lokomotionssystems mit drei halbschalenförmigen Schwimmkörpern im Wasser [Bec13b]

**Tab. 6.1:** Charakteristische Zahlenwerte des amphibischen Prototyps

<b>Parameter des Prototyps</b>			
Länge x Breite x Höhe	$L \times B \times H$	$68 \times 94 \times 18$	mm <sup>3</sup>
Radius der Schwimmkörper	$R$	10	mm
Masse	$m_R$	2,5	g
Erregungsfrequenzband	$f$	0,04 ... 10	kHz
<b>Parameter von Wasser (20°C)</b>			
Dichte	$\rho$	1000	kg/m <sup>3</sup>
Dynamische Viskosität	$\eta$	$1 \cdot 10^{-3}$	Ns/m <sup>2</sup>
Oberflächenspannung	$\sigma$	$72,75 \cdot 10^{-3}$	N/m
Kontaktwinkel mit Messing	$\theta_K$	$\approx 70$	°
Kapillarlänge	$l_K$	$\approx 2,7$	mm
<b>Typische Bewegungsdaten</b>			
(Erregungsamplitude: 24 V, Frequenz: 430 Hz)			
<i>Terrestrische Lokomotion</i>			
Geschwindigkeit	$v_L$	25	mm/s
Winkelgeschwindigkeit	$\omega_L$	15	°/s
Maximale Vortriebskraft	$F_A - F_W$	$\approx 1$	mN
<i>Aquatische Lokomotion</i>			
Geschwindigkeit	$v_W$	13	mm/s
Winkelgeschwindigkeit	$\omega_W$	9	°/s
Maximale Vortriebskraft	$F_A - F_W$	$< 1$	mN
<b>Charakteristische dimensionslose Kennzahlen</b>			
$(v_c = 25 \text{ mm/s}, L_c = 10 \text{ mm}, m_{max} = 5 \text{ g})$			
Reynolds	$Re$	$\approx 250$	
Bond	$Bo$	$\approx 13,5$	
Baudoin	$Ba$	$\approx 3,6$	

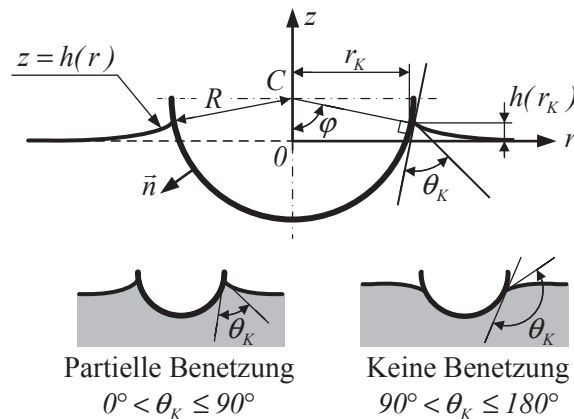
## 6.1 Statische Betrachtung des amphibischen Prototyps

Im Entwurfsprozess eines amphibischen Roboters ist die Kenntnis der maximalen Tragfähigkeit seiner Schwimmkörper von zentraler Bedeutung. Sie müssen die Gesamtmasse aus Roboter und Last abstützen. Die Tragfähigkeit kann durch die geometrische Gestaltung und Materialwahl der Schwimmkörper beeinflusst werden.

In diesem Abschnitt wird ein mechanisches Modell zur Berechnung der maximalen Gesamtmasse eines Roboters mit halbkugelförmigen Schwimmkörpern hergeleitet und numerisch untersucht. Charakteristische Kennzahlen werden berechnet und interpretiert.

### 6.1.1 Herleitung der Tragfähigkeitsberechnungen

Wie in Abb. 6.2 dargestellt, werden die Schwimmkörper als starre Halbkugeln mit dem Radius  $R$  modelliert. Sie sind teilweise in eine Flüssigkeit eingetaucht. In Abhängigkeit der Stoffpaarung kann die Flüssigkeit den Festkörper nicht oder partiell benetzen. Der Kontaktwinkel wird mit  $\theta_K$  bezeichnet. Zur Beschreibung des rotationssymmetrischen Problems werden ein kartesisches Koordinatensystem  $(x, y, z)$  und ein zylindrisches Koordinatensystem  $(r, \psi, z)$ , mit  $r = \sqrt{x^2 + y^2} > 0$  und  $0 \leq \psi < 2\pi$ , eingeführt. Der Ursprung  $O$  beider Systeme liegt im Schnittpunkt der vertikalen Mittelachse der Halbkugel und der ungestörten Flüssigkeitsoberfläche. Die Mittelachse und die Verbindungsgerade von Mittelpunkt  $C$  der Halbkugel zu der Kontaktlinie  $L_K$  zwischen Körper, Flüssigkeit und Gasatmosphäre schließen den Winkel  $\varphi$  ein. Für eine Halbkugel gilt  $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ .



**Abb. 6.2:** Darstellung des rotationssymmetrischen Modells eines Schwimmkörpers im zylindrischen Koordinatensystem  $(r, \psi, z)$  in einer Ebene  $\psi = \text{konst.}$  mit der Oberflächenform  $z = h(r)$  der Flüssigkeit für verschiedene Benetzungsfälle

Die geometrische Form der Oberfläche der Flüssigkeit  $z = h(r)$  kann mithilfe der Young-Laplace-Gleichung

$$\rho g h(r) = 2\sigma K \quad (6.1)$$

ermittelt werden, wobei  $K$  die Mittelkrümmung der Oberfläche beschreibt. Eine allgemeine Oberfläche sei in der Vektorform  $\vec{r} = \vec{r}(u, v)$  definiert. Es gilt

$$d\vec{r} = \partial_u \vec{r} du + \partial_v \vec{r} dv \quad (6.2)$$

## 6 Prototyp für die amphibische Lokomotion

und für das Differential der Bogenlänge

$$ds^2 = d\vec{r}^2 = E du^2 + 2F du dv + G dv^2. \quad (6.3)$$

Diese sogenannte erste Fundamentalform (6.3) beinhaltet alle metrischen Eigenschaften der Fläche. In der zweiten Fundamentalform

$$-d\vec{n} d\vec{r} = L du^2 + 2M du dv + N dv^2 \quad (6.4)$$

sind die Krümmungseigenschaften der Fläche erfasst. Es gilt

$$\begin{aligned} E &= (\partial_u \vec{r})^2, & F &= (\partial_u \vec{r})(\partial_v \vec{r}), & G &= (\partial_v \vec{r}_v)^2, \\ L &= (\partial_{uu}^2 \vec{r})\vec{n}, & M &= (\partial_u \partial_v \vec{r})\vec{n}, & N &= (\partial_{vv}^2 \vec{r})\vec{n} \end{aligned} \quad (6.5)$$

und

$$\vec{n} = \frac{\partial_u \vec{r} \times \partial_v \vec{r}}{|\partial_u \vec{r} \times \partial_v \vec{r}|}, \quad |\partial_u \vec{r} \times \partial_v \vec{r}| = \sqrt{EG - F^2}. \quad (6.6)$$

Eine rotationssymmetrische Fläche kann in der Parameterform  $x = x(\psi, r)$ ,  $y = y(\psi, r)$ ,  $z = z(\psi, r)$  definiert werden, wobei gilt

$$x = r \cos \psi, \quad y = r \sin \psi, \quad z = h(r). \quad (6.7)$$

Durch das orthogonale Koordinatennetz ergibt sich

$$F = 0, \quad M = 0 \quad (6.8)$$

und damit folgt für die erste und zweite Fundamentalform (6.3) und (6.4)

$$d\vec{r}^2 = \underbrace{(1 + h'^2)}_{=E} dr^2 + \underbrace{r^2}_{=G} d\psi^2 \quad (6.9)$$

und

$$-d\vec{n} d\vec{r} = \underbrace{\frac{h''}{\sqrt{1+h'^2}}}_{=L} dr^2 + \underbrace{\frac{h'r}{\sqrt{1+h'^2}}}_{=N} d\psi^2. \quad (6.10)$$

Die Hauptkrümmungen  $k_1$  und  $k_2$ , bzw. die Hauptkrümmungsradien  $R_1 = \frac{1}{k_1}$  und  $R_2 = \frac{1}{k_2}$ , können aus den Lösungen der quadratischen Gleichung

$$0 = k^2 EG - k(LG + NE) + LN \quad (6.11)$$

bestimmt werden. Damit ergibt sich für die Gaußsche Krümmung

$$K_{\text{Gauß}} = k_1 k_2 = \frac{LN}{EG} = \frac{h'' h' r}{r^2 (1 + h'^2)^2} = \frac{h'' \frac{h'}{r}}{(1 + h'^2)^2} \quad (6.12)$$

und für die gesuchte mittlere Krümmung

$$K = \frac{k_1 + k_2}{2} = \frac{LG + NE}{2EG} = \frac{\frac{h'' r^2}{\sqrt{1+h'^2}} + \frac{(1+h'^2)h' r}{\sqrt{1+h'^2}}}{2r^2(1+h'^2)} = \frac{h'' + \frac{h'^3}{r} + \frac{h'}{r}}{2(1+h'^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (6.13)$$

## 6.1 Statische Betrachtung des amphibischen Prototyps

Durch Einsetzen von (6.13) in (6.1) folgt die Young-Laplace-Gleichung für den rotations-symmetrischen Fall:

$$\rho gh(r) = \sigma \frac{h'' + \frac{h'^3}{r} + \frac{h'}{r}}{(1 + h'^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (6.14)$$

Die Randbedingungen für diese nichtlineare Differentialgleichung zweiter Ordnung beschreiben, dass in einer hinreichend großen Entfernung ( $r \rightarrow +\infty$ ) vom Schwimmkörper die Flüssigkeitsoberfläche unbeeinflusst bleibt und das Fluid mit dem Schwimmkörper an der Kontaktstelle ( $r = r_K$ ) den Winkel  $\theta_K$  einschließt:

$$\begin{aligned} r \rightarrow +\infty: \quad & h = 0, \quad h' = 0, \quad h'' = 0; \\ r = r_K: \quad & h'(r_K) = \tan(\varphi + \theta_K), \quad \text{mit } r_K = R \sin \varphi. \end{aligned} \quad (6.15)$$

Für die beiden Benetzungsfälle, vergl. Abb. 6.2, gilt:

$$h(r_K) \begin{cases} \geq 0, & 0^\circ < \theta_K \leq 90^\circ, \\ < 0, & 90^\circ < \theta_K \leq 180^\circ. \end{cases} \quad (6.16)$$

(6.14) wird unter Nutzung der Randbedingungen (6.15) mit dem Programm *Maple*<sup>®</sup> 16 numerisch gelöst, wodurch die Oberflächenform  $z = h(r)$  und die vertikale Koordinate  $h(r_K)$  der Kontaktlinie  $L_K$  bestimmt werden.

Auf die Schwimmkörper des Roboters wirken Schwerkraft  $\vec{F}_G$ , statischer Auftrieb  $\vec{F}_{Auf}$  und Oberflächenspannungskraft  $\vec{F}_\sigma$ . Aus dem Kräftegleichgewicht (6.17) lässt sich die Tragfähigkeit des Roboters berechnen.

$$\vec{0} = \vec{F}_G + \vec{F}_{Auf} + \vec{F}_\sigma \quad (6.17)$$

Die Gesamtmasse des Roboters  $m_R$  sei gleichmäßig auf drei Schwimmkörper verteilt. Für die auf einen Schwimmkörper wirkende Schwerkraft ergibt sich damit

$$\vec{F}_G = \frac{1}{3} m_R \vec{g} = \left( 0, 0, -\frac{1}{3} m_R g \right). \quad (6.18)$$

$\vec{F}_{Auf}$  ist eine von der Flüssigkeit ausgeübte Kraft, die der Gewichtskraft eines eingetauchten Körpers entgegen wirkt. Aus der Rotationssymmetrie des Systems wird ersichtlich, dass die Auftriebskraft ausschließlich in  $z$ -Richtung wirkt.  $\vec{F}_{Auf}$  kann durch Integration der Druckdifferenz aus hydrostatischen Druck  $p(z)$  und dem Druck  $p_0$  bei  $z = 0$  über die benetzte Oberfläche  $A_B$  bestimmt werden:

$$\vec{F}_{Auf} = - \iint_{A_B} \left( p(z) - p_0 \right) \vec{n} dA. \quad (6.19)$$

Der hydrostatische Druck steigt linear mit der Tiefe an:

$$p(z) = p_0 - g\rho z. \quad (6.20)$$

## 6 Prototyp für die amphibische Lokomotion

Der Normalenvektor  $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$  steht senkrecht auf der Fläche  $A_B$  und zeigt in Flüssigkeitsrichtung. Seine Komponenten sind

$$\begin{aligned} n_x &= \frac{1}{R} \sqrt{R^2 - [z - h(r_K) - R \cos \varphi]^2} \cdot \cos \psi, \\ n_y &= \frac{1}{R} \sqrt{R^2 - [z - h(r_K) - R \cos \varphi]^2} \cdot \sin \psi, \\ n_z &= \frac{1}{R} (z - h(r_K) - R \cos \varphi). \end{aligned} \quad (6.21)$$

Der Kugeloberflächenabschnitt  $A_B$  wird in der Parameterdarstellung  $x = x(\psi, z)$ ,  $y = y(\psi, z)$  und  $z = z(\psi, z)$  definiert, wobei  $0 \leq \psi < 2\pi$  und  $-R + h(r_K) + R \cos \varphi \leq z \leq h(r_K)$  gilt:

$$A_B : \left\{ \sqrt{R^2 - [z - h(r_K) - R \cos \varphi]^2} \cdot \cos \psi, \sqrt{R^2 - [z - h(r_K) - R \cos \varphi]^2} \cdot \sin \psi, z \right\}. \quad (6.22)$$

Für die Auftriebskraft  $\vec{F}_{Auf} = (0, 0, F_{Auf})$  ergibt sich mit (6.8)

$$F_{Auf} = \iint_{A_B} (p(z) - p_0) n_z dA = \int_0^{2\pi} \int_{-R+h(r_K)+R\cos\varphi}^{h(r_K)} g \rho z n_z \sqrt{EG} dz d\psi \quad (6.23)$$

wobei gilt

$$\begin{aligned} E &= \left( \frac{\partial x_1}{\partial \psi} \right)^2 + \left( \frac{\partial y_1}{\partial \psi} \right)^2 + \left( \frac{\partial z_1}{\partial \psi} \right)^2 = R^2 - [z - h(r_K) - R \cos \varphi]^2, \\ G &= \left( \frac{\partial x_1}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial y_1}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial z_1}{\partial z} \right)^2 = \frac{R^2}{R^2 - [z - h(r_K) - R \cos \varphi]^2} \end{aligned} \quad (6.24)$$

und somit

$$\sqrt{EG} = R. \quad (6.25)$$

Durch Einsetzen von (6.25) und (6.21) in (6.23) folgt für die  $z$ -Komponente der Auftriebskraft

$$\begin{aligned} F_{Auf} &= 2\pi \rho g \int_{-R+h(r_K)+R\cos\varphi}^{h(r_K)} z \cdot [z - h(r_K) - R \cos \varphi] dz \\ &= \frac{\pi}{3} \rho g R^3 (1 - \cos \varphi)^2 (2 + \cos \varphi) - \pi \rho g R^2 h(r_K) \sin^2 \varphi \end{aligned} \quad (6.26)$$

Mittels Integration der Oberflächenspannung  $\sigma$  entlang der Kontaktlinie  $L_K$  kann die Oberflächenspannungskraft  $\vec{F}_\sigma$  bestimmt werden. Durch die Rotationssymmetrie des Problems besitzt sie nur eine  $z$ -Komponente, wobei sie im Fall partieller Benetzung in negative  $z$ -Richtung, im nicht benetzenden Fall in positive  $z$ -Richtung wirkt.

$$\vec{F}_\sigma = \left( 0, 0, - \int_{L_K} \sigma \sin(\theta_K + \varphi) dl \right) = \left( 0, 0, -2\pi \sigma R \sin \varphi \sin(\theta_K + \varphi) \right) \quad (6.27)$$



## 6.1 Statische Betrachtung des amphibischen Prototyps

Durch Einsetzen von (6.18), (6.26) und (6.27) in (6.17) und Umstellen nach  $m_R$  kann die gesuchte maximale Gesamtmasse eines amphibischen Roboters mit drei halbkugelförmigen Schwimmkörpern berechnet werden:

$$m_R = \pi \rho R^3 (1 - \cos \varphi)^2 (2 + \cos \varphi) - 3 \pi \rho R^2 h(r_K) \sin^2 \varphi - \frac{6 \pi \sigma R}{g} \sin \varphi \sin(\theta_K + \varphi). \quad (6.28)$$

### 6.1.2 Berechnung von Tragfähigkeit und charakteristischen Kennzahlen

In Abb. 6.3 sind die Ergebnisse der numerischen Auswertung von (6.28) für beispielhafte Kontaktwinkel und Radien gegeben. Die Randbedingung  $\varphi = 90^\circ$  bezieht sich auf den besprochenen Prototyp, dessen Schwimmkörper als Halbschalen mit leicht erhöhten Rand konstruiert sind, siehe Abb. 6.4. Es wird sichergestellt, dass der Roboter soweit wie möglich eingetaucht ist, ohne dass sich seine Schwimmkörper mit Flüssigkeit füllen können. Der Kontaktwinkel ist abhängig von Materialparametern, Umgebungsbedingungen, der Benetzungsdauer und dem zeitlichen Verlauf der Benetzung. Dadurch sind wiederholbare Messungen unter konstanten Bedingungen außerordentlich schwierig [Gaj08]. Für die meisten Materialkombinationen ist der Kontaktwinkel nicht bekannt. Die gegebenen Winkel  $\theta_K$  korrespondieren in etwa mit den Kombinationen von Wasser und Edelstahl ( $50^\circ$ ), Messing ( $70^\circ$ ), Polyethylen (PE) ( $90^\circ$ ) und Polytetrafluoroethylen (PTFE) ( $110^\circ$ ) in Luftatmosphäre. Für den Prototyp muss der Fall partieller Benetzung betrachtet werden, wie in Abb. 6.4 ersichtlich wird. Der Roboter hat eine Masse von 2,5 g und kann eine Zusatzlast von weiteren 2,5 g tragen, was für den untersuchten Prototyp experimentell bestätigt werden konnte. Die charakteristischen Kennzahlen für ein Objekt an der Flüssigkeitsoberfläche werden nach (2.27) und (2.29) bestimmt. Die Baudoin-Zahl wurde für den Roboter mit maximaler Zusatzlast  $m = m_{max} = 5$  g bestimmt. Die größte Eintauchtiefe beträgt 10 mm. Die Gesamtlänge der Kontaktlinien zwischen den drei Schwimmkörpern des Roboters, der Flüssigkeit und der Luftatmosphäre ist  $L_K = 3 \cdot 2\pi R$ .

$$Ba = \frac{mg}{\sigma L_K} = 3,6$$

Es folgt, dass der Roboter als „hydrostatisch großes Objekt“ gilt, da  $Ba > 1$  und seine charakteristische Länge  $L_c = R = 10$  mm größer als die Kapillarlänge von Wasser  $l_k = 2,7$  mm ist. Er kann sich an der Flüssigkeitsoberfläche halten, da seine durchschnittliche Dichte geringer als die des Wassers ist. Die ermittelte Bond-Zahl

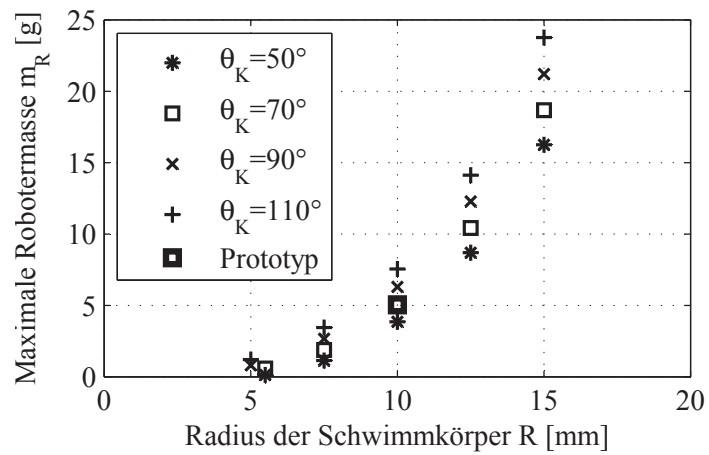
$$Bo = \frac{\rho g L_c^2}{\sigma} \sim \frac{F_{Auf}}{F_\sigma} = 13,7$$

wird durch das Verhältnis aus Auftriebskraft (6.26) und Oberflächenspannungskraft (6.27) bestätigt:

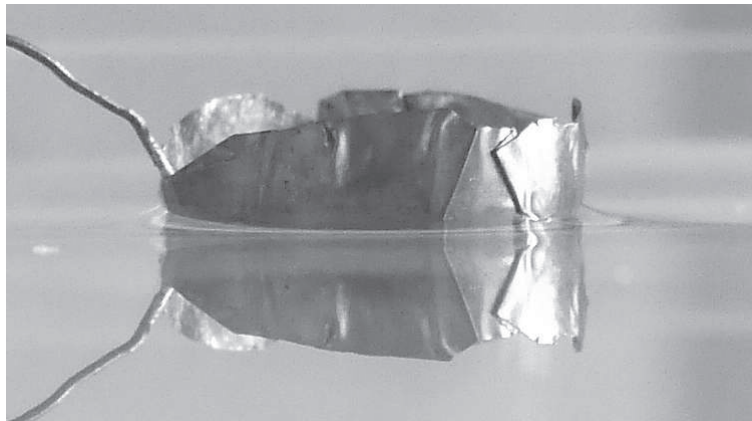
$$\frac{F_{Auf}}{F_\sigma} = \frac{15,7 \text{ mN}}{1,6 \text{ mN}} \approx 10.$$

Die Gewichtskraft wird im wesentlichen durch hydrostatischen Auftrieb gestützt. Die Kraft, die aus der Oberflächenspannung resultiert, ist vergleichsweise gering.

## 6 Prototyp für die amphibische Lokomotion



**Abb. 6.3:** Numerische Ergebnisse des Zusammenhangs aus Kontaktwinkel, Radius und maximaler Gesamtmasse eines Roboters für  $\varphi = 90^\circ$

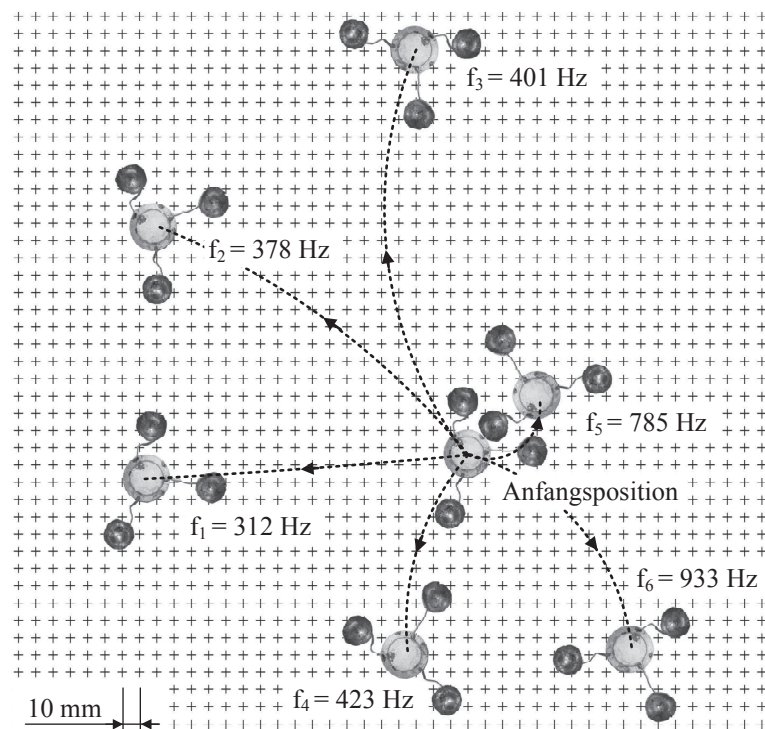


**Abb. 6.4:** Teilweise eingetauchter Schwimmkörper des Prototyps, benetzt von Wasser

## 6.2 Experimentelle Untersuchung des Bewegungsverhaltens des amphibischen Prototyps

### 6.2.1 Terrestrische Lokomotion des amphibischen Prototyps

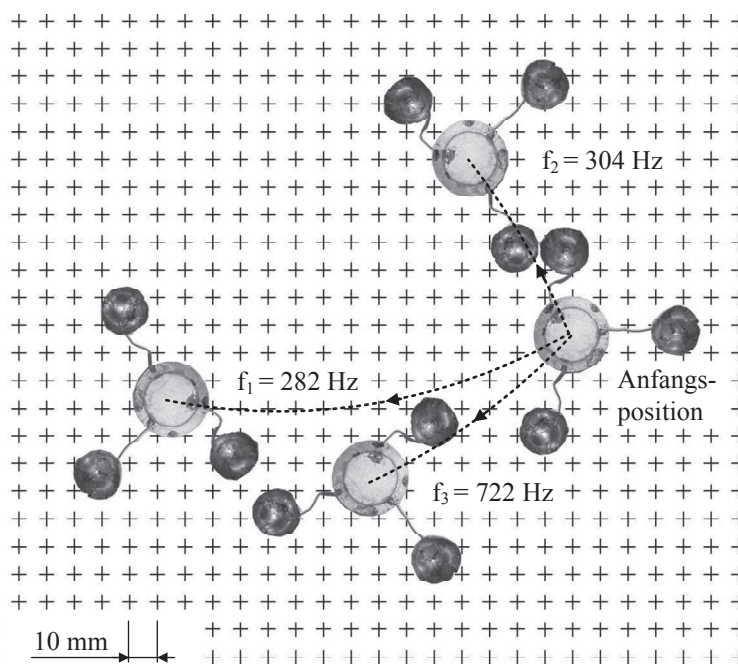
Der Roboter nutzt das gleiche terrestrische Lokomotionsprinzip, wie die im Kapitel 5 beschriebenen Systeme. In Abb. 6.5 wird am Beispiel der Bewegung auf einer Glasplatte die Steuerbarkeit verdeutlicht. Dargestellt ist die Überlagerung von Einzelbildern der Anfangsposition und von sechs Endpositionen des Prototyps für verschiedene Bewegungsfrequenzen nach einer Aufnahmezeit von 5 s. Pendelkraftmessungen, siehe Anhang A.2, ergaben eine maximal erzeugbare Vortriebskraft von  $F_A - F_W \approx 1$  mN. Es wurden Geschwindigkeiten im Bereich von 5 mm/s bis 30 mm/s gemessen.



**Abb. 6.5:** Steuerbarkeit des amphibischen Prototyps auf einer Glasoberfläche: Anfangsposition und Endpositionen des Roboters für verschiedene Antriebsfrequenzen mit eingezeichneten Trajektorien des geometrischen Mittelpunktes nach einer Bewegungszeit von 5 s [Bec13b]

### 6.2.2 Aquatische Lokomotion des amphibischen Prototyps

Für die aquatische Lokomotion sind die Schwimmkörper teilweise eingetaucht. Die Vibration des Antriebselements wird durch die Beine auf die Schwimmkörper übertragen und erzeugt eine nicht symmetrische Druckverteilung über die Benetzungsflächen. Diese führt zu hydrodynamischen Kräften zwischen der Flüssigkeit und den Schwimmkörpern mit einer horizontalen Komponente ungleich null. Das System kann sich an der Wasseroberfläche fortbewegen. Die Vortriebskräfte sind deutlich geringer als auf festem Grund und liegen im Bereich von  $0 \text{ mN} < F_A - F_W < 1 \text{ mN}$ . Abb. 6.6 zeigt die Überlagerung von Einzelbildern der Anfangsposition und von drei Endpositionen des Prototyps für verschiedene Bewegungsfrequenzen. Für eine bestimmte Antriebsfrequenz bewegt sich der Roboter mit gleichzeitig überlagerter Rotation in eine definierte Richtung. Der Bewegungsbereich wird durch die Steifigkeit der Versorgungsdrähte auf wenige Zentimeter begrenzt. Bleibt nach Erreichen der Endposition der Antrieb eingeschaltet, bewegt sich das System auf einer Kreisbahn um den Aufhängungspunkt der Drähte. Wird der Antrieb ausgeschaltet, führen die Versorgungsdrähte das System in Richtung seiner Ausgangsposition zurück.



**Abb. 6.6:** Steuerbarkeit des amphibischen Prototyps im Wasser: Anfangsposition und Endpositionen des Roboters für verschiedene Antriebsfrequenzen mit eingezeichneten Trajektorien des geometrischen Mittelpunktes [Bec13b]

Durch die Erregungsfrequenzbandbreite und die frequenzabhängigen Schwingungsamplituden der Beine (Resonanzeffekte) sind auch die Reynolds-Zahlen der periodischen Bewegung der Schwimmkörper frequenzabhängig. Zur Berechnung der Reynolds-Zahl (2.24) für die Lokomotion des Roboters werden als charakteristische Größen  $L_c = R = 10 \text{ mm}$  und  $v_c = 25 \text{ mm/s}$  festgelegt. Es folgt

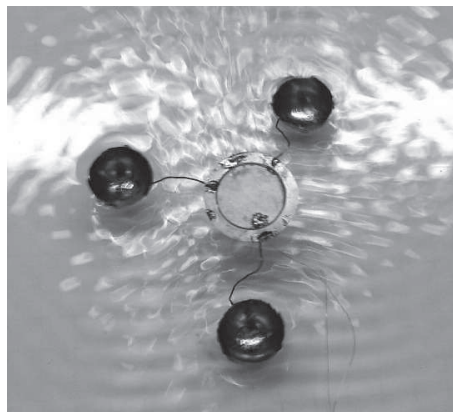
$$Re = \frac{L_c v_c}{\nu} = 250.$$

## 6.2 Experimentelle Untersuchung des Bewegungsverhaltens

Für die genannten Größen zeigt sich, dass die Trägheitskraft des Wassers die Lokomotion stärker beeinflusst als die Zähigkeitskraft, siehe (2.24).

### Erregungsfrequenz $f < 50$ Hz

Die Experimente zeigten, dass die Vibrationen der Schwimmkörper zu einer Bewegung des Wassers führen. Für kleine Frequenzen,  $f < 50$  Hz, kann das Schwingungsverhalten visuell nachvollzogen werden. Die Grundfrequenzen der jeweiligen Beine liegen im Bereich von 30 Hz bis 40 Hz. Trotz der viskosen Dämpfung der Schwimmkörper im Kontakt mit der Flüssigkeit können Schwingungsamplituden der Schwimmkörperbewegungen von bis zu 3 mm beobachtet werden. Die Schwimmkörper vibrieren überlagert in vertikaler und horizontaler Richtung und erzeugen Schwere-Kapillar-Wellen mit Wellenlängen von 5 mm bis 10 mm, siehe Abb. 6.7. Mit steigender Frequenz verringert sich die Wellenlänge. Über 210 Hz können mit dem benutzten Visualisierungssystemen<sup>1</sup> keine Wellen mehr wahrgenommen werden. Im betrachteten Frequenzband von 0 Hz bis 50 Hz führt das System keine Lokomotion durch.



**Abb. 6.7:** Wellenerzeugung des Prototyps bei einer Erregungsfrequenz von 20 Hz

### Erregungsfrequenz $f > 200$ Hz

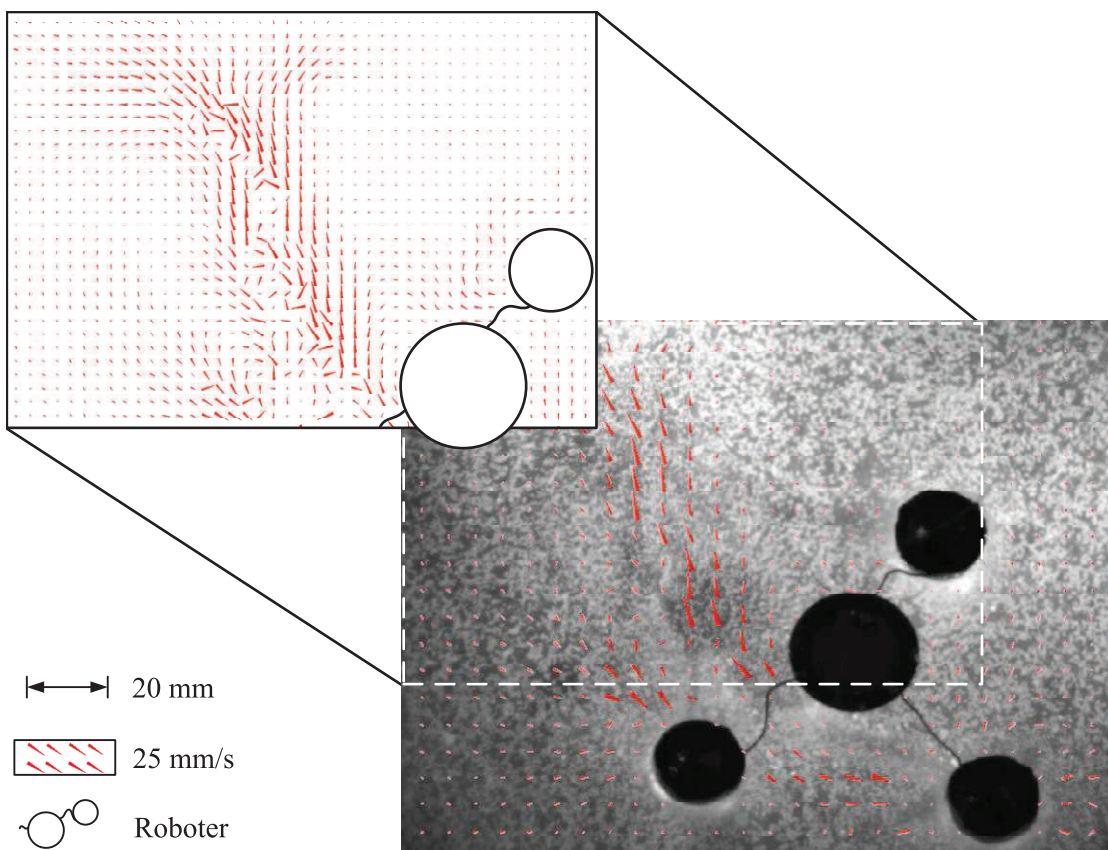
Wird der Aktor mit einer Wechselspannung im Frequenzbereich  $f > 200$  Hz angesteuert, können vibrationsinduzierte Strömungen und Wirbel beobachtet werden. Sie entstehen an den vibrierenden Schwimmkörpern, wobei das Strömungsbild frequenzabhängig beeinflusst werden kann. Zur Sichtbarmachung der Strömungen an der Flüssigkeitsoberfläche werden Lycopodium-Sporen verwendet. Dieses stark hydrophobe Material hat eine geringere Dichte als Wasser und folgt den Flüssigkeitsströmungen an der Oberfläche. Starke lineare Strömungen können im Frequenzbereich von 200 Hz bis 750 Hz beobachtet werden. In diesem Bereich liegen die größten Geschwindigkeiten des Roboters von 5 mm/s bis 25 mm/s. Höhere Frequenzen resultieren in keiner oder einer vergleichsweise langsamen Bewegung des Roboters.

<sup>1</sup> Kameramodell: HCC-1000, Hersteller: VDS Vosskühler GmbH, Deutschland

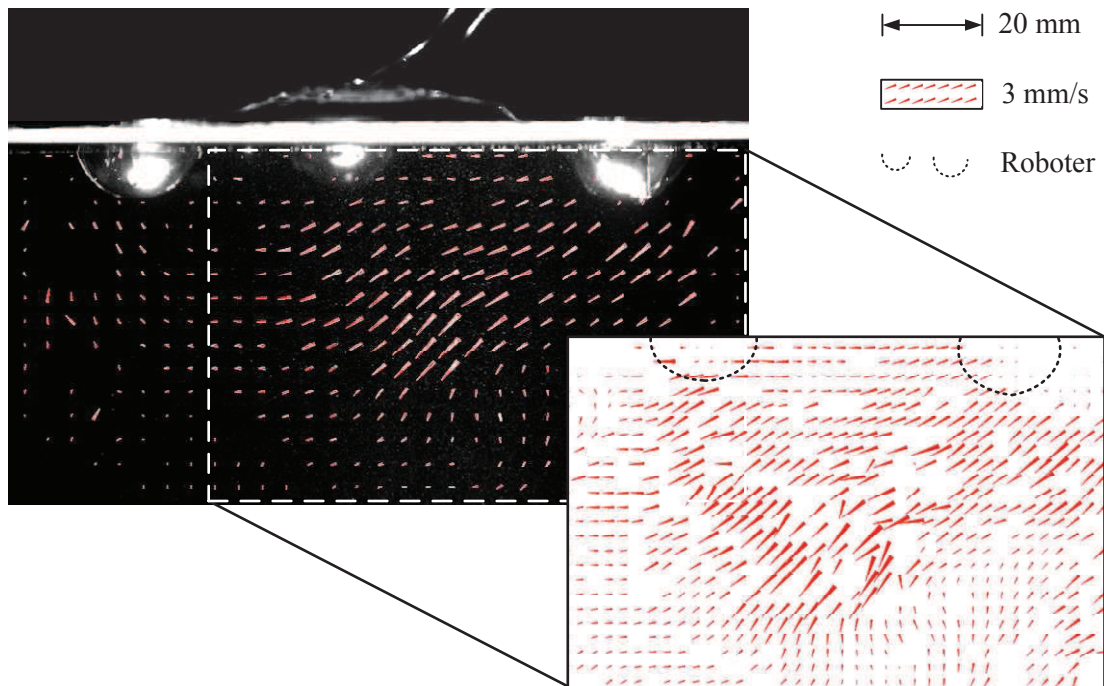


## 6 Prototyp für die amphibische Lokomotion

Die schwingungstechnischen Eigenschaften des Roboters, besonders der Beine und Schwimmkörper, und die strömungsmechanischen Eigenschaften des Wassers führen bei Änderung der Erregungsfrequenz zu unterschiedlichen Bewegungszuständen der Flüssigkeit. Sie werden in dieser Arbeit nicht betrachtet, sondern nur exemplarisch für eine Frequenz von 430 Hz abgebildet. In Abb. 6.8 wird die Oberflächenströmung dargestellt, mit der eine gerichtete Bewegung mit hoher Geschwindigkeit erzeugt werden kann. Abb. 6.9 zeigt für die gleiche Frequenz, dass auch im Inneren des Wassers Strömungen und Verwirbelungen erzeugt werden können.



**Abb. 6.8:** Strömung an der Oberfläche der Flüssigkeit, erregt durch den fixierten Prototyp mit einer Erregungsfrequenz von 430 Hz, visualisiert durch die Verfolgung von Lycopodium-Sporen; Kameramodell: HCC-1000; Hersteller: VDS Vosskühler GmbH, Deutschland; Aufnahmeparameter: 66 FPS; Partikelverfolgung mit Software: ILA VidPIV 3.0; Zulieferer: Intelligent Laser Applications GmbH, Deutschland [Bec13b]



**Abb. 6.9:** Flüssigkeitsbewegung in einer Ebene vor dem fixierten Prototyp mit einer Erregungsfrequenz von 430 Hz, visualisiert durch die Verfolgung („Particle Image Velocimetry“) von Laser-beleuchteten Polyamid-Partikeln mit einer relativen Dichte zu Wasser von 1,02 und einem durchschnittlichen Durchmesser von  $5 \mu\text{m} \pm 1,5 \mu\text{m}$ ; Zulieferer des Messsystems: Intelligent Laser Applications GmbH, Deutschland [Bec13b]

### 6.3 Zusammenfassung der Untersuchungen des amphibischen Prototyps

Die Anwendbarkeit des Prinzip „intelligence by mechanics“ [Bli07] auf amphibische vibrationsgetriebene Roboter wurde nachgewiesen. Frequenzabhängige Schwingungseigenschaften des elastischen Gesamtsystems ermöglichen die zweidimensionale Steuerbarkeit des Roboters auf festem Untergrund und an der Oberfläche von Flüssigkeiten. Es wird nur ein Aktor verwendet.

Die terrestrische Lokomotion basiert auf nicht symmetrischer Reibung, Reibstößen und Trägheitseffekten. Die aquatische Lokomotion wird durch die nicht symmetrische Druckverteilung über die Benetzungsflächen der Schwimmkörper erzeugt. Die resultierenden hydrodynamischen Kräfte führen zur Lokomotion des Roboters und der Entstehung von Strömungen in der Flüssigkeit. Das Gewicht des Roboters wird im Wesentlichen durch statischen Auftrieb gestützt.





# 7 Zusammenfassung und Ausblick

## 7.1 Zusammenfassung

Der Gegenstand dieser Arbeit ist die Mechanik von mobilen Robotern für terrestrische und aquatische Lokomotion. Ziel war es, das Prinzip „intelligence by mechanics“ [Bli07] auf vibrationsgetriebene Lokomotionssysteme anzuwenden, um eine steuerbare Lokomotion durch nur einen Antrieb zu erzeugen.

Dazu wurden auf Basis mechanischer Grundlagen die Prinzipien der terrestrischen und aquatischen Lokomotion vorgestellt und klassifiziert. Mit Blick auf die praktische Realisierung von mobilen Robotern für unterschiedliche Umgebungsbedingungen wurden Antriebssysteme in ihrer Eignung als Vibrationsquellen bewertet. Dazu wurden Kennwerte aus der Literatur verwendet und eine qualitative Bewertung abgeleitet. Piezoelektrische Antriebe besitzen dabei eine besondere Eignung. Die Untersuchung des Standes der Technik verdeutlichte die Anwendbarkeit von vibrationsgetriebener Lokomotion für miniaturisierte technische Anwendungen in terrestrischer und aquatischer Umgebung. Es zeigte sich jedoch, dass das Potential „intelligenter Mechaniken“ noch nicht ausgeschöpft wird und einfache mechanische Modelle, die prinzipielle Bewegungsmechanismen verdeutlichen, benötigt werden.

Die verschiedenen Wirkmechanismen von Borsten wurden mit einem Mehrkörpersystemmodell und experimentellen Untersuchungen analysiert. Die Antriebskraft wird durch die Vibration innerer Massen erzeugt. Roboter mit Borsten sind klein, einfach, preiswert und schnell und können gekapselt realisiert werden. Es zeigte sich das hohe Potential in der Anwendung als Inspektionssysteme für Röhren. Die Erkenntnisse der modellbasierten und experimentellen Untersuchungen wurden für die Entwicklung eines innovativen Prototyps genutzt.

Für eine steuerbare zweidimensionale Lokomotion mit nur einem Antrieb müssen die Grenzen von klassischen Starrkörpersystemen überwunden werden. Die vorgestellten Roboter nutzen das frequenzabhängige Schwingungsverhalten von elastischen Übertragungselementen die durch piezoelektrische Biegeaktoren zu hochfrequenten Schwingungen erregt werden. Zur Untersuchung wurden kontinuumsmechanische Modelle sowie Finite-Elemente-Methoden verwendet und durch experimentelle Untersuchungen erweitert. Es zeigte sich, dass durch die frequenzabhängigen Schwingungseigenschaften der betrachteten elastischen Systeme, das Bewegungsverhalten von mobilen Robotern gesteuert werden kann. Resonanzeffekte werden genutzt. Der periodische Kontaktverlust der Beine des Systems ist für die Lokomotion von Bedeutung. Experimente verdeutlichten, dass trotz modellbasierter Voruntersuchungen, ein durch die Konstruktion der Roboter vordefiniertes Bewegungsverhalten kaum realisierbar ist, da geringe Unterschiede und Änderungen in den

## *7 Zusammenfassung und Ausblick*

mechanischen Eigenschaften das Schwingungsverhalten stark beeinflussen. Das frequenzabhängige Bewegungsverhalten muss für jeden Roboter experimentell bestimmt werden. Einen Ausblick auf die zukünftige Anwendung solcher Systeme für technische Inspektions- und Transportaufgaben wurde durch den programmier- und fernsteuerbaren Prototyp „Beetle-Robot“ gegeben. Er erreicht Geschwindigkeiten bis 100 mm/s und kann das Fünffache seiner Masse transportieren.

Abschließend wurde ein amphibischer Prototyp vorgestellt, der mit einem einzigen Antrieb eine steuerbare Lokomotion auf festem Untergrund und an der Oberfläche von Flüssigkeiten durchführen kann. Seine Konstruktion basiert auf den Betrachtungen der hochfrequenten terrestrischen Roboter. Frequenzabhängige Schwingungseigenschaften und ein piezoelektrischer Biegeaktor werden verwendet. Eine zweidimensionale Steuerbarkeit des Roboters auf festem Untergrund und an der Oberfläche von Flüssigkeiten ist möglich. Die aquatische Lokomotion wird durch die nicht symmetrische Druckverteilung über die Benetzungsflächen der Schwimmkörper erzeugt. Die resultierenden hydrodynamischen Kräfte führen zur Lokomotion des Roboters und der Entstehung von Strömungen in der Flüssigkeit. Das Gewicht des Roboters wird im Wesentlichen durch statischen Auftrieb gestützt.

Es wurde nachgewiesen, dass das Prinzip „intelligence by mechanics“ in vibrationsgetriebenen Lokomotionssystemen angewendet werden kann. Nur ein Antrieb ist notwendig, um eine in der Ebene steuerbare (amphibische) Lokomotion zu erzeugen.

## 7.2 Ausblick

Als Ausblick seien an dieser Stelle weiterführende Aufgaben genannt, die sich aus der Bearbeitung des Themas ergeben haben.

Für die vorgestellten Lokomotionssysteme sollte die Möglichkeit zur starken Verkleinerung geprüft werden, um ihr Potential für Aufgaben in der Mikrosystemtechnik zu ermitteln. Eine Miniaturisierung wird durch den einfachen Aufbau begünstigt, der keine relativ zueinander bewegten Körper umfasst. Die elektromagnetischen Aktoren der Roboter mit Borsten können durch Antriebe auf der Basis von „intelligenten Werkstoffen“ ersetzt werden. Sie können die hohen Erregungsfrequenzen erzeugen, die in miniaturisierten Systemen benötigt werden. Der Einfluss von Adhäsion auf die terrestrischen Systeme ist zu berücksichtigen.

Zukünftige Arbeiten sollten den Bereich der Modellierung und Simulation umfassen, um qualitative und quantitative Zusammenhänge zwischen Ansteuerungsparametern und Lokomotionsverhalten der Roboter zu finden. So kann eine optimale Konstruktion und effektive Ansteuerung erzielt werden.

Besonders die Effekte der „nicht glatten Mechanik“ bedürfen einer weiteren Vertiefung. Der Kontaktverlust der Systeme und das Abstoßen von Untergründen mit signifikanter Rauigkeit müssen in den Betrachtungen berücksichtigt werden. Resonanzamplituden sind wichtige Größen für die behandelten Lokomotionssysteme. Frequenzabhängige Dämpfungswerte sollten experimentell ermittelt und in Modelle einbezogen werden.

Eine Weiterentwicklung der Roboter mit hochfrequentem Antrieb, die sie robuster gegen Änderungen von Umgebungs- und Systemeigenschaften macht, kann ihre Leistungsfähigkeit und Anwendbarkeit in der mobilen Robotik weiter steigern.

Zusätzlich sollte geprüft werden, ob die sensorischen Fähigkeiten der verwendeten Piezoelemente genutzt werden können, um während der Bewegung Informationen zu sammeln, z. B. um die Untergrundeigenschaften zu ermitteln (fest oder flüssig) und dadurch die Antriebsfrequenzen automatisiert anzupassen.



# A Anhang

## A.1 Kennwerte der Antriebssysteme

In Tab. A.1 sind Kennwerte der in Abschnitt 2.5 besprochenen Antriebssysteme gegeben. Es sind Richtwerte, da ihre tatsächliche Größe von der konkreten Realisierung, sowie Einbau- und Energiestellungsbedingungen abhängig ist. Außer bei den elektrostatischen Antrieben gelten die Kenngrößen für charakteristische Volumen im makroskopischen Bereich von  $10 - 1000 \text{ mm}^3$ .

Zur Erzeugung von vibrationsgetriebener Lokomotion sind Kraft, Stellweg und Erregungsfrequenz von besonderer Bedeutung, da sie Amplitude und Frequenz der Antriebsschwingung bestimmen. Zum Vergleich der Antriebskraft verschiedener Aktoren wird diese auf die charakteristische Querschnittsfläche des Antriebselements bezogen, bzw. die erzeugbare mechanische Spannung gegeben. Der Stellweg ist prozentual zur Aktorlänge (ohne Gehäuse) dargestellt.

Ein Ziel der mobilen Robotik ist es, autonome Systeme zu gestalten, die ihre Energiequelle mit sich führen. Solche kompakten Energiequellen, wie Batterien und Akkumulatoren auf Lithium-Basis, Superkondensatoren oder Solarzellen, liefern normalerweise Ausgangsspannungen im Bereich weniger Volt [Kar12]. Aktoren, die geringe Betriebsspannungen benötigen und sparsam mit der gespeicherten elektrischen Energie umgehen, sind somit von Vorteil. Zur Bewertung können die Größen Energiedichte, spezifische Leistung und Wirkungsgrad heran gezogen werden. Das Arbeitsvermögen pro Stellweg in Bezug auf das aktive Aktorvolumen wird als Energiedichte bezeichnet. Die spezifische Leistung ist die Ausgangsleistung des Aktors im Bezug auf die Masse des aktiven Werkstoffs. Das Verhältnis von aufgenommener elektrischer zu abgegebener mechanischer Leistung wird Wirkungsgrad genannt. Die Skalierung der Antriebskraft bei ähnlicher Verkleinerung des Roboters kann als Indiz für die Eignung eines Aktors für miniaturisierte Systeme betrachtet werden.

**Tab. A.1:** Kennwerte von Antriebssystemen für miniaturisierte, vibrationsgetriebene mobile Roboter aus Abschnitt 2.5

Aktor	Relative Kraft (Moment) [MPa]	Relativer Stellweg [%]	Frequenz [Hz]	Spannung [V]	Energiedichte [J/m <sup>3</sup> ]	Spezifische Leistung [W/kg]	Wirkungsgrad	Skalierung
<b>Klassische elektrische Aktoren</b>								
Gleichstrom- magnete	< 0,1 [Kal12]	14 – 32 [Gra06]	< 1000 [Ise08]	1 – 24 [Kal12]	~ 10 <sup>6</sup> [Dar92]	10 <sup>1</sup> – 10 <sup>3</sup> [Zup02]	0,5 – 0,8 [Jan13]	s <sup>2</sup> (s <sup>4</sup> )
Gleichstrom- motoren	0,1 – 50 mNm [Gro13]	Rotation	< 400 [Gro13]	1 – 24 [Gro13]	10 <sup>5</sup> – 10 <sup>6</sup> [Ise08]	10 <sup>0</sup> – 10 <sup>3</sup> [Zup02]	0,5 – 0,8 [Gro13]	[Ish96] ([Jan13])
Elektrostatische Plattenaktoren	< 0,03 [Jan13]	< 50 [Jan13]	< 5000 [Ebe02]	5 – 500 [Dar92]	10 <sup>3</sup> – 10 <sup>5</sup> [TA98]	10 <sup>4</sup> – 10 <sup>5</sup> [Zup02]	< 0,9 [Jan13]	s <sup>0</sup> [Ish96]
<b>Intelligente Werkstoffe</b>								
Piezoelektrische Stapelaktoren (PZT)	< 100 [Jan13]	0,1 – 0,6 [Pon05]	10 <sup>5</sup> [Pon05]	> 100 [Chu12]	~ 10 <sup>4</sup> [Pon05]	10 <sup>3</sup> – 10 <sup>9</sup>	0,7 – 0,9	s <sup>2</sup>
Piezoelektrische Biegeaktoren (PZT)	< 0,2 [Jan13]	1 – 5 [Ish96]	< 10 <sup>5</sup>	5 – 200 [Dar92]	10 <sup>2</sup> – 10 <sup>4</sup> [Pon05]	[Zup02]	[Pon05]	[Pon05]
Drähte aus Formge- dächtnislegierung (NiTi)	< 250 [Pon05]	< 8 [Pon05]	< 5 [Pon05]	> 2 [Chu12]	10 <sup>5</sup> – 10 <sup>6</sup> [Pon05]	10 <sup>1</sup> – 10 <sup>4</sup> [Zup02]	< 0,03 [Pon05]	s <sup>2</sup> [Wau01]
Ionische Polymer- Metall-Verbunde	< 0,3 [Chu12]	> 40 [Chu12]	< 100 [Pon05]	> 1 [Pon05]	10 <sup>4</sup> – 10 <sup>5</sup> [Jan13]	< 10 <sup>1</sup> [Pon05]	< 0,1 [Jan13]	s <sup>2</sup> [Pon05]

## A.2 Beschreibung des Pendelkraftmesssystems

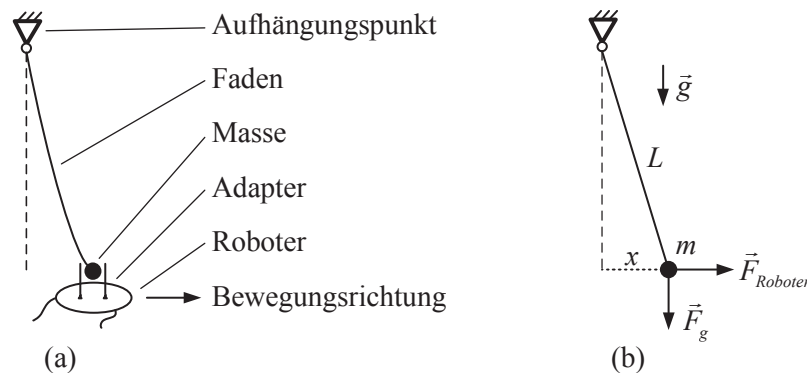
Für die Messung der erzeugbaren Kräfte der Roboter im Bereich von  $0 \text{ mN} < F_A - F_W < 120 \text{ mN}$  wird das in Abb. A.1 (a) dargestellte Messsystem verwendet.

Eine Masse  $m$  wird an einem  $L = 1700 \text{ mm}$  langem Draht frei hängend befestigt. Am Roboter befindet sich ein Adapter zur Führung der Masse. Der eingeschaltete Roboter kann sich auf dem Untergrund zweidimensional bewegen, bis seine Antriebskraft nicht mehr ausreicht, um das Pendel weiter auszulenken. Die Masse  $m$  wird für das jeweilige Messobjekt so gewählt, dass  $x < 150 \text{ mm}$  gilt. Dadurch ist der Winkel des Fadens, der als masseloser starrer Körper modelliert wird, siehe Abb. A.1 (b), kleiner als  $5^\circ$ . Die Genauigkeit des Messsystems wird vor jedem Versuch mit einer bekannten Kraft geprüft.

Der Betrag der vom Roboter erzeugten Kraft kann über die gemessene Auslenkung  $x$  berechnet werden:

$$F_{\text{Roboter}} = \frac{mg}{L}x.$$

Für die Messung der Haftreibungskraft wird der ausgeschaltete Roboter quasi-statisch mit einer Schrittweite von  $\Delta x \approx 1 \text{ mm}$  bewegt, bis das Pendel eine Rückstellbewegung bewirkt.



**Abb. A.1:** Schematische Darstellung der Pendelkraftmessung: (a) - Skizze des Messaufbaus; (b) - Mechanisches Modell

### A.3 Materialkennwerte der Piezokeramik für die numerischen Untersuchungen

Die vollständige Materialkennwerte des Materials PIC 151 wurden von der Firma PI Ceramic GmbH, Deutschland zur Verfügung gestellt. Sie wurden unter Verwendung von Testkörpern ermittelt, die in Geometrie und Dimensionen dem Standard DIN EN 50324 2 entsprechen.

**Tab. A.2:** Vollständige Materialkennwerte des Materials PIC 151

Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	$7,76 \cdot 10^3$	$N_1$	Hz m	1384
			$N_3$	Hz m	1817
$Q_m$		88	$N_5$	Hz m	1050
$\epsilon_{11}^T$		1936	$N_p$	Hz m	1915
$\epsilon_{33}^T$		2109	$N_t$	Hz m	2118
$\epsilon_{11}^\sigma$		1110	$d_{31}$	m/V	$-2,14 \cdot 10^{-10}$
$\epsilon_{33}^\sigma$		852	$d_{33}$	m/V	$4,23 \cdot 10^{-10}$
$\tan \delta$		$15,7 \cdot 10^{-3}$	$d_{15}$	m/V	$6,10 \cdot 10^{-10}$
$k_{31}$		0,382	$g_{31}$	Vm/N	$-1,15 \cdot 10^{-2}$
$k_{33}$		0,697	$g_{33}$	Vm/N	$2,18 \cdot 10^{-2}$
$k_{15}$		0,653	$g_{15}$	Vm/N	$3,65 \cdot 10^{-2}$
$k_p$		0,663	$e_{31}$	N/Vm	-9,60
$k_t$		0,528	$e_{33}$	N/Vm	15,10
$\nu$		0,34	$e_{15}$	N/Vm	12,00
$s_{11}^E$	m <sup>2</sup> /N	$1,683 \cdot 10^{-11}$	$c_{11}^E$	N/m <sup>2</sup>	$1,076 \cdot 10^{11}$
$s_{33}^E$	m <sup>2</sup> /N	$1,900 \cdot 10^{-11}$	$c_{33}^E$	N/m <sup>2</sup>	$1,004 \cdot 10^{11}$
$s_{55}^E$	m <sup>2</sup> /N	$5,096 \cdot 10^{-11}$	$c_{55}^E$	N/m <sup>2</sup>	$1,962 \cdot 10^{10}$
$s_{12}^E$	m <sup>2</sup> /N	$-5,656 \cdot 10^{-12}$	$c_{12}^E$	N/m <sup>2</sup>	$6,312 \cdot 10^{10}$
$s_{13}^E$	m <sup>2</sup> /N	$-7,107 \cdot 10^{-12}$	$c_{13}^E$	N/m <sup>2</sup>	$6,385 \cdot 10^{10}$
$s_{44}^E$	m <sup>2</sup> /N	$5,096 \cdot 10^{-11}$	$c_{44}^E$	N/m <sup>2</sup>	$1,962 \cdot 10^{10}$
$s_{66}^E$	m <sup>2</sup> /N	$4,497 \cdot 10^{-11}$	$c_{66}^E$	N/m <sup>2</sup>	$2,224 \cdot 10^{10}$
$s_{11}^D$	m <sup>2</sup> /N	$1,436 \cdot 10^{-11}$	$c_{11}^D$	N/m <sup>2</sup>	$1,183 \cdot 10^{11}$
$s_{33}^D$	m <sup>2</sup> /N	$9,750 \cdot 10^{-11}$	$c_{33}^D$	N/m <sup>2</sup>	$1,392 \cdot 10^{11}$
$s_{55}^D$	m <sup>2</sup> /N	$2,924 \cdot 10^{-11}$	$c_{55}^D$	N/m <sup>2</sup>	$3,420 \cdot 10^{10}$
$s_{12}^D$	m <sup>2</sup> /N	$-8,112 \cdot 10^{-12}$	$c_{12}^D$	N/m <sup>2</sup>	$7,376 \cdot 10^{10}$
$s_{13}^D$	m <sup>2</sup> /N	$-2,250 \cdot 10^{-12}$	$c_{13}^D$	N/m <sup>2</sup>	$4,436 \cdot 10^{10}$
$s_{44}^D$	m <sup>2</sup> /N	$2,924 \cdot 10^{-11}$	$c_{44}^D$	N/m <sup>2</sup>	$3,420 \cdot 10^{10}$
$s_{66}^D$	m <sup>2</sup> /N	$4,497 \cdot 10^{-11}$	$c_{66}^D$	N/m <sup>2</sup>	$2,224 \cdot 10^{10}$



# Literaturverzeichnis

- [Aba07] ABAZA, K.: *Ein Beitrag zur Anwendung der Theorie undulatorischer Lokomotion auf mobile Roboter*, Dissertation, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau (2007)
- [Abb07] ABBOTT, J.J.; NAGY, Z.; BEYELER, F. und NELSON, B.J.: Robotics in the Small, Part I: Microbotics. *IEEE Robot. Automat. Mag.* (2007), Bd. 14(2): S. 92–103
- [Alt96] ALTENBACH, H.; ALTENBACH, J. und RIKARDS, R.: *Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke: Modellierung und Berechnung von Balken und Platten aus Verbundwerkstoffen*, Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, Stuttgart (1996)
- [Aos93] AOSHIMA, S.; TSUJIMURA, T. und YABUTA, T.: A Miniature Mobile Robot Using Piezo Vibration for Mobility in a Thin Tube. *J. Dyn. Sys., Meas., Control* (1993), Bd. 115(2A): S. 270–278
- [Asa95] ASANO, M.; MATSUOKA, T.; OKAMOTO, H.; MITSUISHI, S. und MATSUI, T.: Study for micro mobile machine with piezoelectric driving force actuator, in: *IEEE ICRA*, Bd. 3, S. 2955–2960
- [Bai11] BAISCH, A.T.; HEIMLICH, Ch.; KARPELSON, M. und WOOD, R.J.: HAMR3: An autonomous 1.7g ambulatory robot, in: *IEEE/RSJ IROS*, S. 5073–5079
- [Bau55] BAUDOIN, R.: La physico-chimie des surfaces dans la vie des Arthropodes aériens des miroirs d'eau, des rivages marins et lacustres et de la zone intercotidale. *Bull. Biol. Fr. Belg.* (1955), Bd. 89: S. 16–164
- [Bay07] BAYINDIR, L. und SAHIN, E.: A Review of studies in swarm robotics. *Turk. J. Elec. Engin.* (2007), Bd. 15(2): S. 115–147
- [Bec09] BECKER, F.: *Modellbildung, Simulation und Entwurf schwingungsbasierter Lokomotionssysteme für 1D- und 2D-Bewegungen*, Diplomarbeit, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau (2009)
- [Bec12] BECKER, F.; MINCHENYA, V.; ZIMMERMANN, K. und ZEIDIS, I.: Single Piezo Actuator Driven Micro Robot for 2-Dimensional Locomotion, in: *Micromechanics and Microactuators*, Bd. 2 von *Mechanisms and Machine Science*, Springer, Niederlande (2012), S. 1–10
- [Bec13a] BECKER, F.; LYSENKO, V.; MINCHENYA, V.; ZEIDIS, I. und ZIMMERMANN, K.: An approach to the dynamics of a vibration-driven robot, in: *Romansy 19*, S. 299–308

## Literaturverzeichnis

- [Bec13b] BECKER, F.; ZIMMERMANN, K.; VOLKOVA, T. und MINCHENYA, V. T.: An amphibious vibration-driven microrobot with a piezoelectric actuator. *Regul Chaotic Dyn* (2013), Bd. 18(1-2): S. 63–74
- [Bec14] BECKER, F.; BÖRNER, S.; LYSENKO, V.; ZEIDIS, I. und ZIMMERMANN, K.: On the mechanics of bristle-bots - modeling, simulation and experiments, in: *Proc. ISR/ROBOTIK (2014)*, VDE Verlag, S. 15–20
- [Bes87] BESOCKE, K.: An easily operable scanning tunneling microscope. *Surface Science* (1987), Bd. 181: S. 145 – 153
- [Bhi08] BHIKKAJI, B. und MOHEIMANI, S. O R: Integral Resonant Control of a Piezo-electric Tube Actuator for Fast Nanoscale Positioning. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* (2008), Bd. 13(5): S. 530–537
- [Bic02] BICO, J.; THIELE, U. und QUÉRÉ, D.: Wetting of textured surfaces. *Colloid Surface. A* (2002), Bd. 206: S. 41–46
- [Ble00] BLEKHMANN, I. I.: *Vibrational mechanics: nonlinear dynamic effects, general approach, application*, World Scientific, Singapore (2000)
- [Bli07] BLICKHAN, R.; SEYFARTH, A.; GEYER, H.; GRIMMER, S.; WAGNER, H. und GÜNTHER, M.: Intelligence by mechanics. *Phil. Trans. R. Soc. A* (2007), Bd. 365: S. 199–220
- [Bob12] BOBADILLA, L.; GOSSMAN, K. und LAVALLE, S. M.: Manipulating Ergodic Bodies through Gentle Guidance, in: *Robot Motion and Control 2011*, Bd. 422 von *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Springer, London (2012), S. 273–282
- [Bol13] BOLOTNIK, N.; PIVOVAROV, M.; ZEIDIS, I. und ZIMMERMANN, K.: The undulatory motion of a chain of particles in a resistive medium in the case of a smooth excitation mode. *ZAMM* (2013), Bd. 93(12): S. 895–913
- [Bor08] BORBONI, A.: *Meso- to micro-actuators: a theoretical and practical approach*, CRC Press LLC, Boca Raton (2008)
- [Bra13] BRAMBILLA, M.; FERRANTE, E.; BIRATTARI, M. und DORIGO, M.: Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective. *Swarm Intelligence* (2013), Bd. 7(1): S. 1–41
- [Bre07] BREGUET, J. M.; DRIESEN, W.; KAEGI, F. und CIMPRICH, T.: Applications of Piezo-Actuated Micro-Robots in Micro-Biology and Material Science, in: *IEEE ICMA*, S. 57–62
- [Bus06] BUSH, J. W. M. und HU, D. L.: Walking on water: biolocomotion at the interface. *Annu. Rev. Fluid Mech.* (2006), Bd. 36: S. 339–369
- [Cao97] CAO, Y. U.; FUKUNAGA, A. S.; KAHNG, A. B. und MENG, F.: Cooperative mobile robotics: antecedents and directions. *Auton. Robot.* (1997), Bd. 4(1)

- [Cap03] CAPRARI, G.: *Autonomous Micro-Robots: Applications and limitations*, Dissertation, École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne (2003)
- [Che14] CHERNOUSKO, F. L.: Dynamics and Optimization of Multibody Systems in the Presence of Dry Friction, in: *Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics*, Bd. 87, Springer New York (2014), S. 71–100
- [Cho02] CHOI, H.R. und RYEW, S.M.: Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines. *Mechatronics* (2002), Bd. 12(5): S. 713 – 736
- [Chu12] CHU, W.-S.; LEE, K.-T.; SONG, S.-H.; HAN, M.-W.; LEE, J.-Y.; KIM, H.-S.; KIM, M.-S.; PARK, Y.-J.; CHO, K.-J. und AHN, S.-H.: Review of biomimetic underwater robots using smart actuators. *Int. Journal of Precision Engineering and Manufacturing* (2012), Bd. 13: S. 1281–1292
- [DA97] DE AMBROGGI, F.; FORTUNA, L. und MUSCATO, G.: PLIF: piezo light intelligent flea-new micro-robots controlled by self-learning techniques, in: *IEEE ICRA*, Bd. 2, S. 1767–1772
- [Dal13] DALTORIO, K. A.; BOXERBAUM, A. S.; HORCHLER, A. D.; SHAW, K. M.; CHIEL, H. J. und QUINN, R. D.: Efficient worm-like locomotion: slip and control of soft-bodied peristaltic robots. *Bioinspiration and Biomimetics* (2013), Bd. 8(3): S. 035003
- [Dar92] DARIO, P.; VALLEGGI, R.; CARROZZA, M. C.; MONTESI, M. C. und COCCO, M.: Microactuators for microrobots: a critical survey. *J. Micromech. Microeng.* (1992), Bd. 2(3): S. 141–157
- [Dau95] DAUGELA, A.; FUJII, H.; JERONYMO, C.E. und MISAKI, A.: Piezo ceramic based locomotive drive, in: *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS '95., Proc. 6th Int. Symp. on*, S. 187–192
- [Dem06] DEMBÉLÉ, S. und ROCHDI, K.: A 3 DOF linear ultrasonic motor for transport and micropositioning. *Sensors and Actuators A Physical* (2006), (125): S. 486–493
- [DeS12] DESIMONE, A. und TATONE, A.: Crawling motility through the analysis of model locomotors: Two case studies. *Eur. Phys. J. E.* (2012), Bd. 35(85)
- [Dil13] DILLER, e. und SITTI, M.: Micro-Scale Mobile Robotics. *Foundations and Trends in Robotics* (2013), Bd. 2(3): S. 143–259
- [Dog10] DOGANGIL, G.; DAVIES, B. L. und RODRIGUEZ Y BAENA, F.: A review of medical robotics for minimally invasive soft tissue surgery. *Proc. Inst. Mech. Eng. H.* (2010), Bd. 224(5): S. 653–679
- [Dov05] DOVICA, M.; GORZÁS, M.; KOVÁÈ, J. und Š. ONDOÈKO: In-Pipe Passive Smart Bristled Micromachine, <http://uni-obuda.hu/conferences/SAMI2004/dovica.pdf> (2005), letzter Zugriff: 07.09.2013

## Literaturverzeichnis

- [Dre09] DRESIG, H. und HOLZWEISSIG, F.: *Maschinendynamik*, Springer, Berlin, Heidelberg (2009)
- [Dri08] DRIESEN, W.: *Concept, Modeling and Experimental Characterization of the Modulated Friction Inertial Drive (MFID) Locomotion Principle: Application to Mobile Microrobots*, Dissertation, École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne (2008)
- [Dud96] DUDEK, G.; JENKIN, M. R. M; MILLIOS, E. und WILKES, D.: A taxonomy for multi-agent robotics. *Auton. Robot.* (1996), Bd. 3(4)
- [Ebe02] EBEFORS, T. und STEMME, G.: Microrobotics, in: *The MEMS Handbook*, The Mechanical Engineering Handbook Series, CRC Press LLC, Boca Raton (2002), S. 28.1–28.42
- [Edq09] EDQVIST, E.; SNIS, N.; MOHR, R. C.; SCHOLZ, O.; CORRADI, P.; GAO, J.; DIÉGUEZ, A.; WYRSCH, N. und JOHANSSON, S.: Evaluation of building technology for mass producible millimetre-sized robots using flexible printed circuit boards. *J. Micromech. Microeng.* (2009), Bd. 19(7)
- [Eig10] EIGOLI, A.K. und VOSSOUGH, G.R.: Dynamic Modeling of Stick-Slip Motion in a Legged, Piezoelectric Driven Microrobot. *Int. J. Adv. Robot. S.* (2010), Bd. 7(3): S. 201–208
- [Est07] ESTAÑA, R. und WOERN, H.: The MiCRoN Robot Project, in: *Autonome Mobile Systeme 2007*, Informatik aktuell, Springer Berlin Heidelberg (2007), S. 334–340
- [Fan14] FANG, Hongbin; WANG, Chenghao; LI, Suyi; XU, Jian und WANG, K. W.: Design and experimental gait analysis of a multi-segment in-pipe robot inspired by earthworm’s peristaltic locomotion. *Proc. SPIE* (2014), Bd. 9055
- [Fer97] FERREIRA, A. und MINOTTI, P.: Control of a multidegree of freedom standing wave ultrasonic motor driven precise positioning system. *Review of Scientific Instruments* (1997), Bd. 68(4): S. 1779–1786, Abb. 3.9 (a) wurde neu abgedruckt aus [Fer97] mit freundlicher Genehmigung. © 1997, AIP Publishing LLC..
- [Fer03] FERREIRA, A. und FONTAINE, J.: Dynamic modeling and control of a conveyance microrobotic system using active friction drive. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* (2003), Bd. 8(2): S. 188–202
- [Fil13] FILIPPOV, A. und GORB, S. N.: Frictional-anisotropy-based systems in biology: structural diversity and numerical model. *Sci. Rep.* (2013), Bd. 3(1240): S. 1–6
- [Fir10] FIREBAUGH, S. L.; PIEPMEIER, J. A. und MCGRAY, C. D.: Soccer at the microscale: Small robots with big impact. *Robot Soccer* (2010)
- [Fle89] FLEISCHER, M.; STEIN, D. und MEIXNER, Hans: Ultrasonic piezomotor with longitudinally oscillating amplitude-transforming resonator. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* (1989), Bd. 36(6): S. 607–613

- [Flo06] FLOYD, S.; KEEGAN, T.; PALMISANO, J. und SITTI, M.: A Novel Water Running Robot Inspired by Basilisk Lizards, in: *IEEE/RSJ IROS*, S. 5430–5436
- [Flo08] FLOYD, S. und SITTI, M.: Design and Development of the Lifting and Propulsion Mechanism for a Biologically Inspired Water Runner Robot. *IEEE T. Robot.* (2008), Bd. 24(3): S. 698–709
- [Fre08] FREJEK, M. und NOKLEBY, S.: Design of a small-scale autonomous amphibious vehicle, in: *Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering*, S. 000781–000786
- [Fuk91] FUKUDA, T.; HOSOKAI, H.; OHYAMA, H.; HASHIMOTO, H. und ARAI, F.: Giant magnetostrictive alloy (GMA) applications to micro mobile robot as a micro actuator without power supply cables, in: *IEEE MEMS*, S. 210–215
- [Gaj08] GAJEWSKI, A.: Contact angle and sessile drop diameter on metal surfaces. *Int. J. Heat Mass Trans.* (2008), Bd. 51: S. 4628–4636
- [Gio13] GIOMI, L.; HAWLEY-WELD, N. und MAHADEVAN, L.: Swarming, swirling and stasis in sequestered bristle-bots. *Proc. R. Soc. A* (2013), Bd. 469(20120637): S. 1–21
- [Glo95] GLOCKNER, Ch.: *Dynamik von Starrkörpersystemen mit Reibung und Stößen*, Bd. 18 von *VDI Fortschrittsberichte Mechanik/Bruchmechanik*, VDI-Verlag, Düsseldorf (1995)
- [Gmb00] GMBH, Polytec: Hardware Manual Polytec Scanning Vibrometer PSV-3000 (2000)
- [Gmi02] GMITERKO, A.; DOVICA, M.; KELEMEN, M.; FEDAK, V. und MLYNKOVA, Z.: In-pipe bristled micromachine, in: *7th Int. Workshop on Adv. Motion Control*, S. 599–603
- [Gra06] GRAMSCH, T.: *Kaskadierte Aktoren als biomimetische Antriebselemente*, Dissertation, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau (2006)
- [Gra10] GRADETSKY, V. G.; KNYAZKOV, M. M.; FOMIN, L. F. und CHASHCHUKHIN, V. G.: *Miniature robot mechanics*, Nauka, Moscow (2010), in Russisch
- [Gro02] GROSS, D.; HAUGER, W.; SCHNELL, W. und WRIGGERS, P.: *Technische Mechanik Band 4: Hydromechanik, Elemente der höheren Mechanik, Numerische Methoden*, Springer, Berlin, Heidelberg (2002)
- [Gro13] GROUP:, Faulhaber: DC-Micromotors, <http://www.faulhaber.com/servlet/com.itmr.waw.servlet.Anzeige?fremdaufruf=ja&kdid=40929&sprachid=1&htdigurl=/n167866/i86089.html> (2013), letzter Zugriff: 07.04.2013
- [Guo05] GUO, Shuxiang; OKUDA, Y. und ASAKA, K.: Hybrid type of underwater micro biped robot with walking and swimming motions, in: *IEEE ICMA*, Bd. 3, S. 1604–1609



## Literaturverzeichnis

- [Guo06] GUO, Shuxiang; GE, Yarning; LI, Lingfei und LIU, Sheng: Underwater Swimming Micro Robot Using IPMC Actuator, in: *IEEE ICMA*, S. 249–254
- [Guo12] GUO, Shuxiang; LI, Maoxun; SHI, Liwei und MAO, Shilian: A smart actuator-based underwater microrobot with two motion attitudes, in: *Int. Conf. Mechatr. Autom.*, S. 1675–1680
- [Hat07] HATAZAKI, K.; KONYO, M.; ISAKI, K.; TADOKORO, S. und TAKEMURA, F.: Active scope camera for urban search and rescue, in: *IEEE/RSJ IROS*, S. 2596–2602
- [He98] HE, S.; CHEN, W.; TAO, X. und CHEN, Z.: Standing wave bi-directional linearly moving ultrasonic motor. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* (1998), Bd. 45(5): S. 1133–1139
- [Her05] HERING, E. und STEINHART, H. (Herausgeber): *Taschenbuch der Mechatronik*, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag (2005)
- [HIB12] HIBOT CORP.: HiBot ACM-R5H, [http://www.hibot.co.jp/en/products/robots\\_1/acm-r5h\\_33](http://www.hibot.co.jp/en/products/robots_1/acm-r5h_33) (2012), letzter Zugriff: 21.05.2014
- [Hof11] HOFFMAN, K.L. und WOOD, R.J.: Passive undulatory gaits enhance walking in a myriapod millirobot, in: *IEEE/RSJ IROS*, S. 1479–1486
- [Hol05] HOLLINGER, G.A. und BRISCOE, J.M.: Genetic Optimization and Simulation of a Piezoelectric Pipe-Crawling Inspection Robot, in: *IEEE ICRA*, S. 484–489
- [Hu03] HU, D. L.; CHANG, B. und BUSH, J. W. M.: The hydrodynamics of water strider locomotion. *Nature* (2003), Bd. 424: S. 663–666, Abb. 3.10 (b) wurde von David Hu zur Verfügung gestellt und mit seiner freundlicher Genehmigung abgedruckt. © 2007, David Hu.
- [Hu07] HU, D. L.; PRAKASH, M.; CHANG, B. und BUSH, J. W. M.: Water-walking devices. *Exp. Fluids* (2007), Bd. 43(5): S. 769–778
- [Hua02] HUANG, J.: *Modellierung, Simulation und Entwurf biomimetischer Roboter basierend auf apedaler undulatorischer Lokomotion*, Dissertation, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau (2002)
- [I-S08] I-SWARM: scientific publications, [http://www.i-swarm.org/MainPage/Publications/Pub\\_Scientific1.htm](http://www.i-swarm.org/MainPage/Publications/Pub_Scientific1.htm) (2008), letzter Zugriff: 07.04.2013
- [IFT12] IFToMM PERMANENT COMMISSION A FOR STANDARDIZATION OF TERMINOLOGY: IFToMM Dictionaries online (Version 3.0), [http://www.iftomm.3me.tudelft.nl/1031\\_2057/frames.html](http://www.iftomm.3me.tudelft.nl/1031_2057/frames.html) (2012), letzter Zugriff: 07.04.2013
- [Inn13] INNOVATION FIRST LABS INC.: Hexbug Nano: The Robotic Creatures that behaves like a real bug, <http://www.hexbug.com/nano/> (2013), letzter Zugriff: 14.08.2013

- [Ioi99] IOI, K.: A mobile micro-robot using centrifugal forces, in: *Proc. on Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, S. 736–741
- [Isa06] ISAKI, K.; NIITSUMA, A.; KONYO, M.; TAKEMURA, F. und TADOKORO, S.: Development of an Active Flexible Cable by Ciliary Vibration Drive for Scope Camera, in: *IEEE/RSJ IROS*, S. 3946–3951
- [Ise08] ISERMANN, R.: *Mechatronische Systeme: Grundlagen*, Springer, Berlin, 2. Aufl. (2008)
- [Ish95] ISHIHARA, H.; FUKUDA, T.; KOSUGE, K.; ARAI, F. und HAMAGISHI, K.: Approach to distributed micro robotic system. Development of micro line trace robot and autonomous micro robotic system, in: *IEEE/RSJ IROS*, Bd. 1, S. 375–380
- [Ish96] ISHIHARA, H.; ARAI, F. und FUKUDA, T.: Micro mechatronics and micro actuators. *IEEE Trans. Mechatron.* (1996), Bd. 1(1): S. 68–79
- [Ish11] ISHIKURA, M.; WAKANA, K.; TAKEUCHI, E.; KONYO, M. und TADOKORO, S.: Running performance evaluation of inchworm drive and vibration drive for active scope camera, in: *IEEE AIM*, S. 599–604
- [Ism12] ISMAIL, I.N.; ANUAR, A.; SAHARI, K.S.M.; BAHARUDDIN, M.Z.; FAIRUZ, M.; JALAL, A. und SAAD, J.M.: Development of in-pipe inspection robot: A review, in: *IEEE STUDENT*, S. 310–315
- [Jan13] JANOCHA, H.: *Unkonventionelle Aktoren: Eine Einführung*, Oldenbourg, München, 2. Aufl. (2013)
- [Jat14] JATSUN, S.; LOKTIONOVA, O. und MALCHIKOV, A.: Six-Link In-pipe Crawling Robot, in: *Romansy 2014, XX CISM-IFTOMM*, Bd. 22, Springer International Publishing (2014), S. 341–348
- [Jon99] JONES, R. M.: *Mechanics of composite materials*, Taylor and Francis, Inc., Philadelphia (1999)
- [Kak13] KAKOGAWA, A. und MA, S.: Mobility of an in-pipe robot with screw drive mechanism inside curved pipes, in: *IEEE ROBIO*, S. 1530–1535
- [Kal12] KALLENBACH, E.; EICK, R.; QUENDT, P.; STRÖHLA, T.; FEINDT, K.; KALLENBACH, M. und RADLER, O.: *Elektromagnete : Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung*, Vieweg und Teubner, Wiesbaden, 4. Aufl. (2012)
- [Kar08] KARPELSON, M.; WEI, G.-Y. und WOOD, R.J.: A review of actuation and power electronics options for flapping-wing robotic insects, in: *IEEE ICRA*, S. 779–786
- [Kar12] KARPELSON, M.; WEI, G.-Y. und WOOD, R. J.: Driving high voltage piezoelectric actuators in microrobotic applications. *Sensor. Actuat. A-Phys.* (2012), Bd. 176: S. 78–89
- [Kas92] KASUGA, M.; TSUKADA, N. und KITAMURA, H.: Standing-wave type ultrasonic motor and timepiece, US Patent No. 5079470, 07/01/92 (1992)

## Literaturverzeichnis

- [Kas06] KASSIM, I.; PHEE, L.; NG, W.S.; GONG, Feng; DARIO, P. und MOSSE, C.A.: Locomotion techniques for robotic colonoscopy. *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* (2006), Bd. 25(3): S. 49–56
- [Kel98] KELLER, J. B.: Surface tension force on a partly submerged body. *Phys. Fluids* (1998), Bd. 10(11): S. 3009–3010
- [Kim05] KIM, B.; LEE, S.; PARK, J. H. und PARK, J.-O.: Design and fabrication of a locomotive mechanism for capsule-type endoscopes using shape memory alloys (SMAs). *IEEE Trans. Mechatron.* (2005), Bd. 10(1): S. 77–86
- [Kle12] KLEIN, M.A.; BOXERBAUM, A.S.; QUINN, R.D.; HARKINS, R. und VAIDYANATHAN, R.: SeaDog: A rugged mobile robot for surf-zone applications, in: *4th IEEE RAS EMBS BioRob*, S. 1335–1340
- [Kul09] KULĆ, I. M.; MANI, M.; MOHRBACH, H.; THAOKAR, R. und MAHADEVAN, L.: Botanical ratchets. *Proc. R. Soc. B* (2009), Bd. 276(1665): S. 2243–2247
- [Lep13] LEPORA, N. F.; VERSCHURE, P. und PRESCOTT, T. J.: The state of the art in biomimetics. *Bioinspiration and Biomimetics* (2013), Bd. 8(1): S. 013001
- [Li11] LI, Weida; LI, Juan; HU, Haiyan; LI, Mantian und SUN, Lining: Analysis and experiment of stick-slip motion principle in a legged microrobot, in: *Strategic Technology (IFOST), 6th Int. Forum on*, Bd. 1, S. 328–332
- [Lic12] LICHENG, Wu; GUOSHENG, Yang und XINKAI, Gui: Developing Strategy Based on Discussing of the State of the Art for a New Water Strider Robot, in: *Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA), 2012 2nd Int. Conf. on*, S. 674–678
- [Lig93] LIGHTHILL, J.: *Waves in fluids*, Cambridge Univ. Press, Cambridge (1993)
- [Lob01] LOBONTIU, N.; GOLDFARB, M. und GARCIA, E.: A piezoelectric-driven inchworm locomotion device. *Mechanism and Machine Theory* (2001), Bd. 36(4): S. 425 – 443, Abb. 3.6 (a) wurde neu abgedruckt aus [Lob01], S. 437, Fig. 7 mit freundlicher Genehmigung. © 2001, Elsevier.
- [Mat93] MATSUOKA, T.; ASANO, M.; FUKUSHIMA, H.; OKAMOTO, H.; UCHIDA, M. und MATSUI, T.: Mechanical analysis for micro mobile machine with piezoelectric element, in: *IEEE/RSJ IROS*, Bd. 3, S. 1685–1690
- [Men07] MENCIASSI, A.; QUIRINI, M. und DARIO, P.: Microrobotics for future gastrointestinal endoscopy. *Minim. Invasiv. Ther.* (2007), Bd. 16(2): S. 91–100
- [Mey06] MEYER, R.: Vibrationsangetriebener autonomer Roboter, DE Patent No. DE 10 2004 047 838 A1, 30/03/06 (2006)
- [MiC06] MICRON: Public Report, <http://lsro.epfl.ch/files/content/sites/lsro/files/shared/HPR/MICROROB/Mobile/MiCRoN-PublicReport.pdf> (2006), letzter Zugriff: 11.04.2014



- [Mim14] MIMLITCH, R.H.; NORMAN, D.A.; WAEGEL, J.R.; NEEDEL, G.E. und LI, G.: Climbing vibration-driven robot, WO Patent App. PCT/US2012/027,914 (2014)
- [Miz98] MIZZI, J.V.: Actuators, motors and wheelless autonomous robots using vibratory transducer drivers, US Patent No. 5770913, 23/06/98 (1998)
- [Moh09] MOHAN, Y. und PONNAMBALAM, S. G.: An extensive review of research in swarm robotics, in: *NaBIC*, S. 140–145
- [Mur09] MURPHY, P.: *The Invasion of the Bristlebots (Box Set of Book and Robots)*, Klutz, Palo Alto (2009)
- [Neh02] NEHMZOW, U.: *Mobile Robotik: Eine praktische Einführung*, Springer, Berlin (2002)
- [Nel10] NELSON, B. J.; KALIAKATSOS, I. K. und ABBOTT, J. J.: Microrobots for Minimally Invasive Medicine. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* (2010), Bd. 12: S. 55–85
- [Ngu06] NGUYEN, A. T. und MARTEL, S.: Miniaturization of a Piezo-Actuation System Embedded in an Instrumented Autonomous Robot, in: *Circuits and Systems, IEEE North-East Workshop on*, S. 261–264
- [Ngu07] NGUYEN, A. T. und MARTEL, S.: Locomotion of a miniature robot based on synchronized vibrating actuation mechanisms, in: *IEEE/ASME AIM*, S. 1–6
- [Oka88] OKABE, S.; YOKOYAMA, Y. und BOOTHROYD, G.: Analysis of Vibratory Feeding Where the Track has Directional Friction Characteristics. *Int J Adv Manuf Tech* (1988), Bd. 3(4): S. 73–85
- [Osk07] OSKAY, W.: Bristlebot: A tiny directional vibrobot, <http://www.evilmadscientist.com/2007/bristlebot-a-tiny-directional-vibrobot/> (2007), letzter Zugriff: 14.08.2013
- [Ost95] OSTROWSKI, J.; BURDICK, J.; LEWIS, A.D. und MURRAY, R.M.: The mechanics of undulatory locomotion: the mixed kinematic and dynamic case, in: *IEEE ICRA*, Bd. 2, S. 1945–1951
- [Ozc10] OZCAN, O.; WANG, Han; TAYLOR, J.D. und SITTI, M.: Surface tension driven water strider robot using circular footpads, in: *IEEE ICRA*, S. 3799–3804
- [Par08] PARK, H.; KIM, B.; PARK, J. O. und YOON, S.-J.: A Crawling Based Locomotive Mechanism Using a Tiny Ultrasonic Linear Actuator (TULA), in: *39th Int. Symposium on Robotics*, S. 85–90
- [Pfe82] PFEIFER, G.: Piezoelektrische lineare Stellantriebe. *Wissenschaftliche Schriftenreihe der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt* (1982), Bd. 6
- [Pfe06] PFEIFFER, F.; FOERG, M. und ULBRICHT, H.: Numerical aspects of non-smooth multibody dynamics. *Comput. Method. Appl. M.* (2006), Bd. 195(50): S. 6891–6908

## Literaturverzeichnis

- [PI 12] PI CERAMIC GMBH: Piezokeramische Materialien und Bauelemente, [http://www.piceramic.de/pdf/Katalog\\_Piezo\\_Technologie\\_Piezo\\_Technik\\_Piezo\\_Mechanik\\_Piezo\\_Bauelemente.pdf](http://www.piceramic.de/pdf/Katalog_Piezo_Technologie_Piezo_Technik_Piezo_Mechanik_Piezo_Bauelemente.pdf) (2012), letzter Zugriff: 24.02.2014
- [Pon05] PONS, J. L.: *Emerging actuator technologies: a micromechatronic approach*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester (2005)
- [Pur77] PURCELL, E. M.: Life at low Reynolds number. *Am. J. Phys.* (1977), Bd. 45(1): S. 3–11
- [Rem97] REMBOLD, U. und FATIKOW, S.: Autonomous Microrobots. *J. Intell. Robotics Syst.* (1997), Bd. 19(4): S. 375–391
- [Rie97] RIEMER, D.: *Untersuchungen zur Berechnung, konstruktiven Gestaltung und technologischen Realisierung von kaskadierbaren elektrostatischen Mikroantrieben*, Dissertation, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau (1997)
- [Roc01] ROCHDI, K. und DEMBÉLÉ, S.: Static behavior of a piezoelectric micro robot, in: *IEEE NANO*, S. 180–184
- [Roh05] ROH, S. und CHOI, H.-R.: Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines. *IEEE Trans. Rob.* (2005), Bd. 21(1): S. 1–17
- [Rom93] ROMAN, H.T.; PELLEGRINO, B.A. und SIGRIST, W.R.: Pipe crawling inspection robots: an overview. *IEEE Trans. Energy Convers.* (1993), Bd. 8(3): S. 576–583
- [Rub14] RUBENSTEIN, M.; AHLER, C.; HOFF, N.; CABRERA, A. und NAGPAL, R.: Kilo-bot: A low cost robot with scalable operations designed for collective behaviors. *Robot. Auton. Syst.* (2014), Bd. 62(7): S. 966 – 975
- [Sah10] SAHU, B.; TAYLOR, C. R. und LEANG, K. K.: Emerging Challenges of Microactuators for Nanoscale Positioning, Assembly, and Manipulation. *J. Manuf. Sci. Eng.* (2010), Bd. 132(3)
- [Sas80] SASHIDA, T.: Supersonic Vibration Driven Motor Device, US Patent No. 4325264, 27/02/80 (1980)
- [Sch89] SCHADE, H. und KUNZ, E.: *Strömungslehre*, Walter de Gruyter, Berlin (1989)
- [Sch01] SCHERGE, M. und GORB, S. N.: *Biological micro- and nanotribology: nature's solutions*, Springer, Berlin (2001)
- [Sch11] SCHULKE, M.; HARTMANN, L. und BEHN, C.: Worm-like locomotion systems: development of drives and selective anisotropic friction structures, in: *Proceedings of the 56th IWK, Ilmenau (2011)*
- [Shi08] SHIN, Bongsu; KIM, Ho-Young und CHO, Kyu-Jin: Towards a biologically inspired small-scale water jumping robot, in: *2nd IEEE RAS EMBS BioRob*, S. 127–131

- [Sim02] SIMU, U.: *Piezoactuators for Miniature Robots*, Dissertation, Uppsala University, Uppsala (2002), Abb. 3.6 (d) wurde mit freundlicher Genehmigung des Autors aus [Sim02] zusammengestellt und neu abgedruckt. © 2002, Urban Simu.
- [Smi92] SMITS, J. G.: Design considerations of a piezoelectric-on-silicon microrobot. *Sensors and Actuators A* (1992), (35): S. 129–135
- [Sni08] SNIS, N.: *Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 431: Actuators for autonomous microrobots*, Dissertation, Uppsala University, Uppsala (2008), Abb. 3.6 (e) sowie Abb. 3.7 (b) und (c) wurden mit freundlicher Genehmigung des Autors aus [Sni08] zusammengestellt und neu abgedruckt. © 2008, Niklas Snis.
- [Son06] SON, K. J.; KARTIK, V.; WICKERT, J. A. und SITTI, M.: An Ultrasonic Standing-Wave-Actuated Nano-Positioning Walking Robot: Piezoelectric-Metal Composite Beam Modeling. *J. Vib. Control* (2006), Bd. 12(12): S. 1293–1309
- [Son07a] SONG, Y. S. und SITTI, M.: Surface-tension-driven biologically inspired water strider robots: theory and experiments. *IEEE T. Robotics* (2007), Bd. 23(3): S. 578–589
- [Son07b] SONG, Yun S. und SITTI, M.: STRIDE: A Highly Maneuverable and Non-Tethered Water Strider Robot, in: *IEEE ICRA*, S. 980–984
- [Ste08] STELZMANN, U.; GROTH, C. und MÜLLER, G.: *FEM für Praktiker - Band 2: Strukturodynamik*, Expert Verlag, Renningen (2008)
- [Ste11] STEIGENBERGER, J.: Some theory towards a stringent definition of 'locomotion'. *Multibody Syst. Dyn.* (2011), Bd. 26(1): S. 81–90
- [Ste12] STEIGENBERGER, J. und BEHN, C.: *Worm-like Locomotion Systems: An intermediate theoretical Approach*, Oldenbourg Wissenschafts Verlag (2012)
- [Stu09] STUDER, C.: *Numerics of Unilateral Contacts and Friction: Modeling and Numerical Time Integration in Non-Smooth Dynamics*, Bd. 47 von *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*, Springer Berlin Heidelberg (2009)
- [Sun01] SUN, L.; ZHANG, Y.; SUN, P. und GONG, Z.: Study on Robots with PZT Actuator for small pipe, in: *Int. Symposium on Micromechatronics and Human Science (2001)*, S. 149–154
- [Suz10] SUZUKI, K.: Bio-Inspired Water Strider Robots with Microfabricated Functional Surfaces, [http://www.intechopen.com/books/biomimetics-learning-from-nature/bio-inspired-water-strider-robots-with\\_microfabricated-functional-surfaces](http://www.intechopen.com/books/biomimetics-learning-from-nature/bio-inspired-water-strider-robots-with_microfabricated-functional-surfaces) (2010), letzter Zugriff: 2014-05-16
- [Sza64] SZABÓ, I.: *Höhere Technische Mechanik: nach Vorlesungen*, Springer, Berlin (1964)

## Literaturverzeichnis

- [TA98] TABIB-AZAR, M.: *Microactuators: Electrical, Magnetic, Thermal, Optical, Mechanical, Chemical & Smart Structures*, Kluwer Academic Publishers, Boston (1998)
- [Tak05] TAKONOBU, H.; KODAIRA, K. und TAKEDA, H.: Water strider's muscle arrangement-based robot, in: *IEEE/RSJ IROS*, S. 1754–1759
- [Tay10] TAYLOR, G; TRIANTAFYLLOU, M. S. und TROPEA, C. (Herausgeber): *Animal Locomotion - The Physics of Flying - The Hydrodynamics of Swimming*, Springer, Berlin, Heidelberg (2010)
- [Tri02] TRIMMER, W. und H., Stroud R.: Scaling of Micromechanical Devices, in: *The MEMS Handbook*, The Mechanical Engineering Handbook Series, CRC Press LLC, Boca Raton (2002), S. 28.1–28.42
- [Uch98] UCHINO, K.: Piezoelectric Ultrasonic Motors: Overview. *Smart Mater. Struct.* (1998), Bd. 7: S. 273–285
- [Uch04] UCHINO, K.; CAGATAY, S.; KOC, B.; DONG, S.; BOUCHILLOUX, P. und STRAUSS, M.: Micro Piezoelectric Ultrasonic Motors. *J. Electroceram.* (2004), Bd. 13(1-3): S. 393–401
- [Uen14] UENO, Shohei; TAKEMURA, Kenjiro; YOKOTA, Shinichi und EDAMURA, Kazuya: Micro inchworm robot using electro-conjugate fluid. *Sensor. Actuat. A-Phys.* (2014), Bd. 216(0): S. 36 – 42
- [VA11] VAHID ALIZADEH, H. und MAHJOOB, M.J.: Quadratic damping model for a spherical mobile robot moving on the free surface of the water, in: *IEEE ROSE*, S. 125–130
- [Vas79] VASILIEV, P.E.: Vibration motor control, UK Patent No. GB 2020875 A (1979)
- [Vog01] VOGEL, M. und VAJDA, F.: Smart Actuators for Miniature Mobile Robots, IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, 2001, Dubrovnik, Croatia: [http://med.ee.nd.edu/MED9/Papers/Robotics/Robotics\\_2/med01-069.pdf](http://med.ee.nd.edu/MED9/Papers/Robotics/Robotics_2/med01-069.pdf) (2001), letzter Zugriff: 31.10.2013
- [Wan08] WANG, Z. und GU, H.: A Bristle-Based Pipeline Robot for Ill-Constraint Pipes. *IEEE Trans. Mechatron.* (2008), Bd. 13(3): S. 383–392
- [Wau01] WAUTELET, M.: Scaling laws in the macro-, micro- and nanoworlds. *Eur. J. Phys.* (2001), Bd. 22(6): S. 601–611
- [Wei02] WEISE, F.: *Entwurf und Konstruktion einer neuartigen Aktuatorik für ein biomimetisches Bewegungssystem*, Diplomarbeit, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau (2002)
- [Wu11] WU, L.; LIAN, Z.; YANG, G. und CECCARELLI, M.: Water Dancer II-a: a Non-tethered Telecontrollable Water Strider Robot, [http://www.intechopen.com/journals/international\\_journal\\_of\\_advanced\\_robotic\\_systems/water\\_dancer\\_](http://www.intechopen.com/journals/international_journal_of_advanced_robotic_systems/water_dancer_)

- ii\_a\_a\_non\_tethered\_telecontrollable\_water\_strider\_robot (2011), letzter Zugriff: 2014-05-16, Veröffentlicht: 2011-09-01, Lizenz: *CC BY 3.0 license*, <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/> .
- [Yag07] YAGUCHI, H.; ISHIKAWA, K. und NANJO, Y.: Considerations of the Performance Characteristics of a Cableless Micro-Actuator by Using Mechanical DC-AC Inverter, in: *Eur. Conf. on Power Electr. and Appl.*, S. 1–5
- [Yu09] YU, Shumei; MA, Shugen; LI, Bin und WANG, Yuechao: An amphibious snake-like robot: Design and motion experiments on ground and in water, in: *Int. Conf. on Information and Automation*, S. 500–505
- [Zha12] ZHAO, J.; ZHANG, X.; CHEN, N. und PAN, Q.: Why Superhydrophobicity Is Crucial for a Water-Jumping Microrobot? Experimental and Theoretical Investigations. *ACS Appl. Mater. Interfaces* (2012), Bd. 4: S. 3706–3711, Abb. 3.10 (f) wurde neu abgedruckt aus [Zha12] mit freundlicher Genehmigung der *American Chemical Society*. © 2012, *American Chemical Society*.
- [Zim09a] ZIMMERMANN, K.; ZEIDIS, I. und BEHN, C.: *Mechanics of terrestrial locomotion: with a focus on non-pedal motion systems*, Springer, Berlin (2009)
- [Zim09b] ZIMMERMANN, K.; ZEIDIS, I.; BOLOTNIK, N. und PIVOVAROV, M.: Dynamics of a two-module vibration-driven system moving along a rough horizontal plane. *Multibody Syst. Dyn.* (2009), Bd. 22(2): S. 199–219
- [Zup02] ZUPAN, M.; ASHBY, M. F. und FLECK, N. A.: Actuator classification and selection - the development of a database. *Adv. Eng. Mat.* (2002), Bd. 4(12): S. 933–940