

Jörg Mämpel

**Definition und exemplarische Realisation eines
modularen Systems für die Kletterrobotik**

Berichte aus der Biomechatronik
Herausgegeben von Prof. Dr. Hartmut Witte
Fachgebiet Biomechatronik an der TU Ilmenau

Band 5

Definition und exemplarische Realisation eines modularen Systems für die Kletterrobotik

Von Jörg Mämpel



Universitätsverlag Ilmenau
2010

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: 20. April 2010

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Tom Ströhla
(Technische Universität Ilmenau)

3. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Karsten Berns
(Technische Universität Kaiserslautern)

Tag der Verteidigung: 27. September 2010

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISSN 1865-9136 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-939473-90-9 (Druckausgabe)

URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2010000399](http://nbn:de:gbv:ilm1-2010000399)

Titelfoto: Dipl.-Biol. Helga Schulze | Bochum

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Fachgebiet Biomechatronik der TU Ilmenau. In den letzten Jahren haben viele Personen Anteil an der Entstehung dieser Arbeit gehabt. Ich danke Herrn Prof. Hartmut Witte für die Möglichkeit, auf einem spannenden und fordernden Gebiet forschen zu können. Die mir gestatteten Freiheiten gepaart mit der Gelegenheit, über den Tellerrand der klassischen Ingenieurwissenschaften blicken zu können, machten die letzten fünf Jahre zu einer sehr interessanten Zeit.

Ich danke Prof. Karsten Berns und Jun.-Prof. Tom Ströhla für die Bereitschaft, Zeit in die Gutachtertätigkeit im Rahmen meines Promotionsverfahrens zu investieren.

Die Arbeiten an Kletterrobotern wurden lange Zeit im Rahmen des Projekts „InspiRat“ durch das BMBF finanziert. Im Rahmen dieses Projekts habe ich viele wertvolle Anregungen für meine Arbeit erhalten. Prof. Stanislav Gorb und Dagmar Voigt danke ich für offene Diskussionen und Anregungen, den einen und den anderen Hinweis für die Arbeit sowie den faszinierenden Einblick in die Haftmechanismen in der Tierwelt. Dr. Andreas Karguth, Christian Trommer und Markus Schweitzer stellten den Roboter RATNIC für die Experimente zur Verfügung. Visuelle und mathematische Einblicke ins Innere kletternder Tiere ermöglichten Prof. Fischer, Dr. Conny Krause, Andre Schmidt, Rommy Petersohn und Dr. Emanuel Andrada.

Dr. Cornelius Schilling danke ich für unzählige, tiefgründige Diskussionen und hilfreiche Kritik. Dr. Kathrin Carl half mit aufmunternden Worten in zähen Phasen, mit der Beratung in biologischen Fragestellungen und mit der Korrektur des Manuskripts.

Mike Stubenrauch danke ich seine fachliche Unterstützung und permanente Diskussionsbereitschaft. Über weite Phasen meiner Arbeit konnte ich zudem auf die fachliche und mentale Unterstützung von Ulrike Fröber bauen. Wolfgang Kempf danke ich für die Bereitschaft jederzeit mit anzufassen, wenn es irgendwo brannte. Für die Beratung und Hilfe bei der Bearbeitung und Erstellung der Grafiken stand Danja Voges jederzeit zur Verfügung.

Eberhard Hamatschek, Max Fremerey, Michael Frock, Lars Fischheiter, Matthias Stützer und Gerrit Dumstorff danke ich für viele Stunden, die sie an den Erodier-, Fräs- und Drehmaschinen verbrachten, um Metall nach meinen Vorstellungen zu formen. Auch ohne Sebastian Köhring würde ich jetzt wahr-

DANKSAGUNG

scheinlich noch in der Werkstatt stehen. Oliver Radler und Sören Rosenbaum danke ich für die Möglichkeit der Nutzung der Mechatronik-Werkstatt und für die Beseitigung akut auftretender Mangelerscheinungen an Kondensatoren, Widerständen und Halbleiterelementen.

An unzähligen kreativen Diskussionen und schöpferischen Dialogen waren Lars Lehmann, Tobias Nowack, Silvia Lehmann, Dr. Beate Schlütter, Stefan Lutherdt, Tobias Schmidt, Teodora Kikova, Gunnar Sievers, Dr. Torsten Gramsch, Irina Gavrilova, Prof. Peter Kurtz und Kerstin Schmidt beteiligt.

Viele Studenten haben in den letzten Jahren meine Begeisterung für die Robotik geteilt. Besonders hervorheben möchte ich René Eisold für das Engagement bei der Elektronikentwicklung, Christoph Funda, Torsten Koch, Kurt Gerlach und Andreas Obermaier für die harte und erfolgreiche Mitarbeit an verschiedenen Modulen. Alle Namen hier zu nennen, würde zu lange dauern – ihnen allen sei mein herzlichster Dank ausgesprochen.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern für die Unterstützung bei all meinen Entscheidungen.

Kurzzusammenfassung

Ziel der Arbeit ist die Anwendung von Konzepten der modularen Robotik in der Kletterrobotik. Klettern als Fortbewegung beinhaltet die Generierung kraft- und momentübertragender Kontakte mit einem Substrat und die Erzeugung von Bewegung als zwei zentrale Aspekte aus funktioneller Sicht. Aktuelle Kletterroboter stellen Spezialentwicklungen mit einem oft eingeschränkten Anwendungsbereich dar. Die Kletterfähigkeit ist zumeist auf einen vorher definierten Substrattyp beschränkt. Mit Hilfe des modularen Ansatzes wird die Funktionsvariabilität im Rahmen dieser Arbeit erweitert.

Aus einer darauf bezogenen Systematik, die aktuelle Kletterrobotersysteme nach der Art des Substratkontakts und der Fortbewegung klassifiziert, werden Anforderungen für die Entwicklung eines modularen Kletterrobotersystems abgeleitet. Diese Entwicklung wird als dreistufiger Entwicklungsprozess nach dem V-Modell der Richtlinie VDI-R 2206 interpretiert. In der ersten Entwicklungsstufe wird eine einheitliche Schnittstelle definiert, über welche alle Module gekoppelt werden können. Darauf aufbauend werden in der zweiten Entwicklungsstufe einheitliche, für alle Module verwendbare Komponenten entworfen und konstruiert. Hierzu zählen ein mechanischer als Grundlage für die Konstruktion und passende mechanische Verbinder zur Kopplung zwischen den Modulen. Des Weiteren wird eine für alle Module zu verwendende Elektronik vorgeschlagen, welche aus einer modulinternen und einer Kommunikationselektronik besteht.

Unter Verwendung der einheitlichen Komponenten werden in der dritten Stufe die Funktionsmodule entwickelt. Exemplarisch werden zwei Bewegungsmodule, drei Greifmodule und ein Energiemodul realisiert. Als Nachweis der Funktionsfähigkeit wird eine Konfiguration aus dem modularen System erstellt, welche eine Kletterfähigkeit auf rundem Substrat besitzt. Als Vergleichssystem steht ein nicht-modulares Robotersystem zur Verfügung. Der Vergleich konstruktionsunabhängiger Parameter zeigt eine Kletterfähigkeit des modularen Systems ähnlich der des integrierten Systems.

Abstract

Current climbing robots are specialists, not generalists. Their climbing capability is often limited to one type of substrate and thus the field of application is restricted. This work aims at a significant increase in adaptability to different substrates. Therefore, a transfer of concepts from modular robotics into a climbing robot is approached.

Climbing is considered as a special kind of locomotion. It is defined by generation of motion in combination with generation of substrate contact. Current climbing robots are classified by their type of locking technology and their type of locomotion. Requirements for the development process of the modular robot are derived from these classifications.

The development of the modular system is implemented as a design process of mechatronic systems as described in the guideline VDI 2206 of the Association of German Engineers. The modular system is developed in three steps. First, the uniform components are defined in its mechanic, electronic and informatic components. In a second step, standardized components are developed, which are used as a base for the design process of different types of modules. These components are a basic frame and different mechanic and electronic connectors for coupling of modules. Furthermore, standardized electronics are used in the modular system for control and communication tasks. In the third step modules with different functions are designed and built: two motion modules, three locking modules and one energy-supply-module.

For comparative studies, a certain configuration of the modular climbing robot is built. Therefore, three rotational and two gripping modules are combined. This robot is able to climb on cylindrical and pike-like substrates with different diameters. It could be shown, different climbing robots can be built up and be adapted to various types of substrate. Several parameters of climbing are quantified in experiments and compared to another climbing robot. The designed modular system is suitable as a base for building up different climbing robots.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	7
Abstract	8
Inhaltsverzeichnis	9
Abbildungsverzeichnis	14
Tabellenverzeichnis	17
Formelzeichen.....	18
Abkürzungsverzeichnis	21
1 Einleitung.....	23
1.1 Motivation.....	23
1.1.1 Klettern in der Natur.....	24
1.1.2 Zielstellung.....	26
1.2 Definitionen.....	28
1.2.1 Klettern.....	28
1.2.2 Robotik	29
1.2.3 Definition Greifen, Greifer und Wirkpaarung	31
1.2.4 Definition Kletterroboter.....	32
1.2.5 Modulare Robotik	33
2 Kletterrobotik	34
2.1 „Ökologische“ Betrachtungen der Kletterroboter	34
2.1.1 Ökologie und ihre Einteilung.....	35
2.1.2 Wechselwirkungen zwischen Robotern und ihrer Umwelt	35
2.1.3 Vergleich von Handhabungs- und Kletterrobotern.....	39
2.1.4 Zeitlicher Verlauf des Substratkontakts.....	40
2.2 Greifersystematik anhand der Wirkpaarung	41
2.2.1 Vorbetrachtungen	41
2.2.2 Klassifikation der Wirkpaarung.....	44
2.3 Fortbewegungssystematik nach Yim	45
2.4 Aktuelle Kletterrobotiksysteme	47
2.4.1 Eingrenzung des Recherchefeldes	47
2.4.2 Kletterroboter mit elektrostatischer Wirkpaarung	48
2.4.3 Kletterroboter mit magnetischer Wirkpaarung.....	49
2.4.4 Kletterroboter mit strömungsbasierten Greifern	50
2.4.5 Kletterroboter mit fluidisch-statischen Unterdruckgreifern	51

2.4.6	Kletterroboter mit Wirkpaarung durch eindringende Festkörper.....	51
2.4.7	Roboter mit mechanisch anpressenden Greifern	52
2.5	Einschätzung des Stands der Technik in der Kletterrobotik.....	53
2.5.1	Einfluss der Wirkpaarung auf die Masse der Kletterroboter	53
2.5.2	Einfluss der Lokomotionsform auf die Masse des Roboters.....	54
2.5.3	Beziehung zwischen Substrateigenschaften und Greifer.....	55
3	Modulare mobile Robotik	59
3.1	Grundlegende Eigenschaften.....	59
3.2	Klassifikation	60
3.3	Kettenbildende modulare Robotersysteme	63
3.3.1	Entwurf eines Referenzsystems.....	65
3.3.2	Bewertung des aktuellen Stands in der modularen Robotik	67
4	Modularisierung in der Mechatronik.....	69
4.1	Grundlagen der ModularisierungModulrahmen	69
4.1.1	Modularisierung technischer Systeme	69
4.1.2	Kriterien für Modularisierung.....	70
4.2	Diversität modularer Systeme	72
4.2.1	Homogenität vs. Heterogenität	72
4.2.2	Aufbau eines modularen heterogenen Systems.....	74
4.3	Abgeleitete Prinzipien des modularen Entwurfs	75
4.3.1	Kriterien.....	75
4.3.2	Modularer Entwurf im der Rahmen der Richtlinie VDI 2206	75
5	Entwurf des modularen Systems.....	79
5.1	Anforderungsdefinition für einen modularen Kletterroboter.....	79
5.1.1	Ziele der Entwicklung des modularen Systems	79
5.1.2	Funktionelle Anforderungen resultierend aus dem Stand der Technik....	79
5.2	Gesamtsystementwurf	80
5.2.1	Funktionsstruktur	80
5.2.2	Vereinfachen der Funktionsstruktur.....	83
5.2.3	Varianten eines modularen Systems	85
5.2.4	Bewertung der Modularisierungsvarianten	86
5.3	Zusammenfassen der Ergebnisse der Modularisierung	89
6	Entwicklung der Schnittstelle	91
6.1	Anforderungen für die Entwicklung der Schnittstelle	91
6.1.1	Schnittstelle als Koppelsystem.....	91
6.1.2	Interne Struktur der Module	92
6.2	Mechanische Struktur.....	94
6.2.1	Modulinterne Struktur der Mechanik	94

6.2.2	Ausführung der mechanischen Schnittstelle	95
6.2.3	Dimensionierung der mechanischen Schnittstelle.....	96
6.3	Elektrisches System.....	97
6.3.1	Modulinterne Struktur der leistungselektronischen Komponenten	97
6.3.2	Ausführung der elektrischen Schnittstelle	99
6.3.3	Dimensionierung der Schnittstelle.....	100
6.3.4	Modulinterne Struktur der elektronischen Teildomäne	100
6.3.5	Ausführung der elektronischen Struktur	102
6.4	Informationsverarbeitung.....	103
6.4.1	Modulinterner Datenfluss	103
6.4.2	Kommunikationsschnittstelle.....	104
6.4.3	Ableiten der Anforderungen für die Schnittstelle	105
6.5	Zusammenfassung der Schnittstellenanforderungen	106
7	Einheitliche Modulkomponenten	108
7.1	Mechanische Modulkomponenten	108
7.1.1	Modulrahmen	108
7.2	Elektronische Modulkomponenten	110
7.2.1	Modulinterne Elektronik.....	110
7.2.2	Kommunikationselektronik.....	112
8	Modulentwicklungen	114
8.1	Einheitliche Anforderungen.....	114
8.2	Bewegungsmodule	116
8.2.1	Rotationsmodul	116
8.2.2	Doppelrotationsmodul.....	117
8.2.3	Mechanische Abtriebsadapter	117
8.3	Greifmodule	118
8.3.1	Fingergreifer.....	118
8.3.2	Unterdruckgreifer.....	120
8.3.3	Magnetgreifmodul.....	121
8.4	Energiespeichermodul	123
8.5	Ergebnisse und Diskussion der Modulentwicklung.....	124
8.5.1	Überblick der Module.....	124
8.5.2	Diskussion: einheitliche Modulkomponenten	124
8.5.3	Diskussion: Bewegungsmodule.....	126
8.5.4	Diskussion: Greifmodule	127
8.5.5	Validierung der Module anhand des Referenzsystems	128
9	Vergleich des modularen mit einem integrierten Konzept	131
9.1	Der Kletterroboter RATNIC	131
9.1.1	Mechanik	131

9.1.2	Elektronik und Steuerung	132
9.1.3	Bewegungsablauf RATNIC.....	133
9.2	Konfiguration zum Klettern an zylinderförmigen Substraten.....	134
9.2.1	Aufbau des Systems	134
9.2.2	Bewegungsablauf der Vergleichskonfiguration.....	135
9.3	Quantitativer Vergleich	136
9.3.1	Methode	136
9.3.2	Ergebnisse des Vergleichs	140
9.3.3	Diskussion der Vergleichsergebnisse.....	140
10	Diskussion und Ausblick	142
10.1	Anwendung der Funktionsmodule	142
10.1.1	Fortbewegung	142
10.1.2	Wirkpaarung.....	143
10.1.3	Energieversorgung	146
10.2	Modulare Struktur	146
10.2.1	Struktur des modularen Systems	146
10.2.2	Anwendung des modularen Systems	148
11	Zusammenfassung.....	149
	Literaturverzeichnis	152
	Thesen.....	161
A	Anhang	163
A.1	Modularisierungsvarianten	163
A.1.1	Variante „Ref“ - Referenzvariante	163
A.1.2	Variante „ $E_{int}I_{int}$ “ - Energie integriert, IV integriert.....	164
A.1.3	Variante „ $E_{zent}I_{zent}$ “ - Energie zentral, IV zentral.....	165
A.1.4	Variante „ $E_{zent}I_{int}$ “ - Energie zentral, IV integriert.....	166
A.1.5	Variante „ $E_{int}I_{zent}$ “ - Energie zentral, IV integriert.....	167
A.2	Übersicht Kletterroboter	168
A.3	Nachrechnungen	170
A.3.1	Klemmverbindung zwischen Modul und Koppelement	170
A.4	Evaluation des System anhand des Spezialsystems RATNIC	171
A.4.1	Steuerungssoftware.....	171
A.4.2	Berechnung der Sollgrößen unter LabView®.....	171
A.4.3	Messmethode	173
A.4.4	Messaufbau.....	174
A.4.5	Abschätzung der Messunsicherheit	175

A.4.6	Messung der Zusatzmasse an RATNIC.....	177
A.4.7	Messung der Zusatzmasse an der Vergleichskonfiguration.....	178
A.4.8	Messprotokoll – Vergleichskonfiguration	179
A.4.9	Messprotokoll – RATNIC	182

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 – Haardichte in Abhängigkeit der Körpermasse.....	25
Abb. 2 – Haft- und Greiforgane in der Natur.....	26
Abb. 3 – Aktuelle Kletterroboter vs. modulare Systeme.....	27
Abb. 4 – Einordnung der Roboterökologie.....	34
Abb. 5 – Wechselwirkungen zwischen einem Roboter und seiner Umwelt.....	36
Abb. 6 – Prinzipdarstellungen der Wirkpaarungen.....	43
Abb. 7 – Klassifikation des Substratkontakts bei Kletterrobotern.....	44
Abb. 8 – Bewegungssystematik für mobile Roboter (erweitert nach [Yim 1995]).....	46
Abb. 9 – Beispiele der aus der Systematik ausgeschlossenen Roboter.....	47
Abb. 10 – Adhäsiv greifende Kletterroboter.....	49
Abb. 11 – Kletterroboter mit magnetischen Greifern.....	50
Abb. 12 – Roboter mit strömungsbasierten Greifer.....	50
Abb. 13 – Kletterroboter mit fluidisch statischen Greifern.....	51
Abb. 14 – Kletterroboter mit eindringenden Greiferstrukturen.....	52
Abb. 15 – Kletterroboter mit mechanisch anpressenden Greifern.....	52
Abb. 16 – Klassifikation aktueller Kletterrobotersysteme nach der Wirkpaarung.....	53
Abb. 17 – Klassifikation aktueller Kletterrobotersysteme nach der Fortbewegung.....	54
Abb. 18 – Verschiedene Klassen des relativen Substratdurchmessers v_s	56
Abb. 19 – Prinzipdarstellung modularer Anordnungen.....	60
Abb. 20 – Kettenförmige, verzweigte und gitterförmige Systeme.....	61
Abb. 21 – Modulare Robotersysteme.....	62
Abb. 22 – Auftretende Kräfte und Momente an den Greifern.....	64
Abb. 23 – Abstraktion einer Kletterroboterstruktur.....	66
Abb. 24 – Prozess der Modularisierung eines Systems.....	69
Abb. 25 – Komplexität des Gesamtsystems.....	71
Abb. 26 – Homogene und heterogene Systeme.....	73
Abb. 27 – Baukastensystem für Roboter [Bögelsack et al. 1985, S. 325].....	74
Abb. 28 – V-Modell als Zyklus im mechatronischen Entwurfsprozess.....	76
Abb. 29 – Entwicklung des modularen mechatronischen Systems.....	77
Abb. 30 – Grundstruktur eines mechatronischen Systems.....	81
Abb. 31 – Systemgrenze des mechatronischen Systems“Kletterroboter“.....	82
Abb. 32 – Präzisierte Funktionsstruktur eines Kletterrobotersystems.....	83
Abb. 33 – Vereinfachte Darstellung der Gesamtstruktur.....	84
Abb. 34 – Optimale Variante des modularen Systems für den Kletterroboter.....	90
Abb. 35 – Modul unter dem Gesichtspunkt des Geheimnisprinzips.....	91
Abb. 36 – Konzept für die interne Modulstruktur.....	93
Abb. 37 – Modul-interne mechanische Struktur der Module.....	94
Abb. 38 – Struktur des modularen Systems in der mechanischen Domäne.....	95

Abb. 39 – Zeichnung der einheitlichen mechanischen Schnittstelle	97
Abb. 40 – Allgemeine modul-interne elektrische Struktur.....	98
Abb. 41 – Konzept der Energieversorgung	99
Abb. 42 – Berechnung der durchschnittlichen Leistungsaufnahme eines Moduls...	100
Abb. 43 – Allgemeine modulinterne informationsverarbeitende Struktur	101
Abb. 44 – Das Informationsbussystem des modularen Systems	102
Abb. 45 – Vereinfachte Darstellung des modulinternen Datenflusses	103
Abb. 46 – Der einheitliche Modulrahmen.....	108
Abb. 47 – Mechanische Koppellemente	109
Abb. 48 – Darstellung elektronischen Komponenten.....	110
Abb. 49 – Ausführungsform der Platinen.....	111
Abb. 50 – Kommunikationsplatine mit Funkeinheit	113
Abb. 51 – Rotationsmodul.....	116
Abb. 52 – Doppelrotationsmoduls	117
Abb. 53 – Varianten realisierter aktorspezifischer Adapter	118
Abb. 54 – Aufbau des Finger-Greifers.....	119
Abb. 55 – Unterdruckgreifer	121
Abb. 56 – Magnetgreifmodul.....	122
Abb. 57 – Energiespeichermodul	123
Abb. 58 – Integration unterschiedlicher Greifmodule in dieselbe Grundstruktur...	127
Abb. 59 – CAD-Darstellung des Referenzsystems	128
Abb. 60 – Abstrahiertes Modul des Referenzsystems	129
Abb. 61 – Kletterroboter RATNIC der Fa. Tetra GmbH (Foto: Tetra GmbH)	132
Abb. 62 – Bewegungsablauf des Roboters RATNIC.....	133
Abb. 63 – RATNIC-äquivalente Testkonfiguration.....	134
Abb. 64 – Bewegungsablauf der Vergleichskonfiguration	135
Abb. 65 – Systematik der Fortbewegung mit realisierter Vergleichskonfiguration ..	142
Abb. 66 – Systematik der Wirkpaarung ergänzt durch die Vergleichskonfiguration	145
Abb. A1– Referenzsystem für die Modularisierung.....	163
Abb. A2 – Modularisierungsvariante $E_{int}I_{int}$	164
Abb. A3 – Modularisierungsvariante $E_{zent}I_{zent}$	165
Abb. A4 – Modularisierungsvariante $E_{zent}I_{int}$	166
Abb. A5 – Modularisierungsvariante $E_{int}I_{zent}$	167
Abb. A8 – Datenflussdiagramm der Steuerungssoftware	171
Abb. A9 – Zustände definiert durch die kinematische Struktur	172
Abb. A10 – Messaufbau zur Erfassung der Kletterparameter	174

Alle nicht einer Quelle entnommenen Abbildungen wurden mit Hilfe folgender Software erstellt bzw. bearbeitet:

- Microsoft® Excel 2003
- Microsoft® Visio 2003
- Dassault Systèmes Solidworks 2007
- Adobe® Photoshop® 7.0

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 – Aufgaben und zugehörige Teilsysteme eines Roboters	33
Tab. 2 – Physisch-topografische und physische Umweltfaktoren für Kletterroboter	37
Tab. 3 – Einfluss der Substrateigenschaften im Entwicklungsprozess	38
Tab. 4 – Vergleich zwischen Greifern von Industrierobotern und Kletterrobotern .	39
Tab. 5 – Eignung der Wirkpaarungen von Kletterrobotern und Substrat.....	57
Tab. 6 – Eigenschaften kinematischer Strukturen modularer Robotersysteme.....	62
Tab. 7 – Technische Parameter und Eigenschaften der Module	63
Tab. 8 – Eignung der modularen Systeme als Kletterroboter	68
Tab. 9 – Quantifikation der Kopplungen und des Entwicklungsaufwands	87
Tab. 10 – Berechnung der Wichtungsfaktoren für die Modularisierungsbewertung.	88
Tab. 11 – Bewertungstabelle der unterschiedlichen Modularisierungsvarianten	89
Tab. 12 – Analogien zwischen physikalischen Domänen in Bezug auf die Leistung.	92
Tab. 13 – Überblick über relevante Parameter verbreiteter Feldbussysteme	106
Tab. 14 – Forderungsliste für die Entwicklung von Modulen	115
Tab. 15 – Überblick über die Bewegungs- und Greifmodule.....	125
Tab. 16 – Ergebnisse der Messung der kinematischen und energetischen Größen.	139
Tab. 17 – Einordnung der entwickelten Greifermodule	144
Tab. A1 – Anzahl (Kopplungen, Module und Funktionsblöcke - Var. Ref).....	163
Tab. A2 – Anzahl (Kopplungen, Module und Funktionsblöcke - Var. $E_{int}I_{int}$)	164
Tab. A3 – Anzahl (Kopplungen, Module und Funktionsblöcke - Var. $E_{zent}I_{zent}$)	165
Tab. A4 – Anzahl (Kopplungen, Module und Funktionsblöcke - Var. $E_{zent}I_{int}$)	166
Tab. A5 – Anzahl (Kopplungen, Module und Funktionsblöcke - Var. $E_{int}I_{zent}$)	167
Tab. A6 – Übersicht über die Kletterroboter.....	168
Tab. A7 – Abhängigkeiten der Sollgrößen für die Antriebe	172
Tab. A8 – Messung der Zusatzmasse an RATNIC.....	177
Tab. A9 – Messung der Zusatzmasse an der Vergleichskonfiguration	178
Tab. A10 – Parameter der Vergleichskonfiguration für die Experimente	179
Tab. A11 – Messwerte (Vergleichskonfiguration, nachsetzend)	180
Tab. A12 – Messunsicherheiten (Vergleichskonfiguration, nachsetzend)	180
Tab. A13 – Messwerte (Vergleichskonfiguration, überschlagend).....	181
Tab. A14 – Messunsicherheiten (Vergleichskonfiguration, überschlagend).....	181
Tab. A15 – Parameter von RATNIC für die Experimente.....	182
Tab. A16 – Messwerte RATNIC, nachsetzend)	183
Tab. A17 – Messunsicherheiten der Messwerte (RATNIC, nachsetzend).....	183

Formelzeichen

Formelzeichen	physikalische Größe	Einheit
B	Magnetflussdichte	T
b_R	Roboterbreite	m
c	Linienlast	$N \cdot m^{-1}$
d_{Sub}	Substratdurchmesser	-
E_{el}	elektrische Energie	Ws
E_{pot}	potentielle Energie	J
f	Freiheitsgrad	-
f_M	Freiheitsgrad eines Moduls	-
F	Kraft	N
F_{Gz}	Greifkraft in z-Achse	N
F_M	Gewichtskraft eines Moduls	N
F_S	Schnittstellenkraft	N
F_{Schr}	axiale Schraubenkraft	N
g	Erdbeschleunigung	$m \cdot s^{-2}$
I	Strom	A
I_S	Strom der Schnittstelle	A
p	Druck	$N \cdot m^{-2}$
p_0	Umgebungsdruck	$N \cdot m^{-2}$
p_1	Arbeitsdruck	$N \cdot m^{-2}$
q	verallgemeinerte Zustandsgröße	-
v	Geschwindigkeit	$m \cdot s^{-1}$
l	Länge	m
l_M	Modullänge	m
$l_{Mf=1}$	normierte Modullänge	m
l_s	Schrittlänge	m
m_{DRM}	Masse des Doppelrotationsmoduls	kg
m_{EM}	Masse des Energiespeichermoduls	kg
m_{FGM}	Masse des Fingergreifermoduls	kg

Formelzeichen	physikalische Größe	Einheit
m_{mK}	Masse des mechanischen Koppelements	kg
m_M	Modulmasse	kg
$m_{Mf=1}$	normierte Modulmasse	kg
m_{RS}	Masse des Referenzsystems	kg
m_R	Robotermasse	kg
m_T	Traglast	kg
M_{Gy}	Greifmoment um die y-Achse	Nm
M_{An}	allg. Antriebsmoment	Nm
M_{Ay}	Antriebsmoment um y-Achse	Nm
$M_{An,erf}$	erforderliches Antriebsmoment	Nm
M_S	Schnittstellenmoment	Nm
n_G	Anzahl der Greifvorgänge	-
n_{RS}	Anzahl der Module im Referenzsystem	-
P_v	Bewertungspunkte	-
P	Leistung	W
P_t	Leistung (translatorisch)	W
P_r	Leistung (rotatorisch)	W
P_{el}	Leistung (elektrisch)	W
R	Ohmscher Widerstand	Ω
R_e	elastische Streckgrenze	$N \cdot mm^2$
R_m	mittlere Rautiefe	μm
s	Steuersignal	-
S_S	Sicherheitsfaktor der Schnittstelle	-
U	Spannung	V
U_I	Stromproportionale Spannung	V
U_S	elektrische Spannung an der Schnittstelle	V
U_V	Versorgungsspannung	V
v_s	Klettergeschwindigkeit	$m \cdot s^{-1}$
W	Gewichtungsfaktor	-

VERZEICHNISSE

Formelzeichen	physikalische Größe	Einheit
η_K	Wirkungsgrad des Kletterns	-
v_{Sub}	relativer Substratdurchmesser	-
ω	Winkelgeschwindigkeit	$rad \cdot s^{-1}$

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
anpr	Festkörper anpressend
CAD	Computer Aided Design
CAN	Controller Area Network
DIN	Deutsche Industrienorm
DRM	Doppelrotationsmodul
eind	Festkörper eindringend
elst	elektrostatisch
EM	Energiespeichermodul
FGM	Fingergreifermodul
fldy	fluidisch-dynamisch
flst	fluidisch-statisch
GM	Greifermodul
NiMH	Nickel-Metallhydrid
I²C	Inter-Integrated Circuit
IC	Integrated Circuit (Integrierter Schaltkreis)
JTAG	Joint Test Action Group
KL	Körperlänge
KM	Körpermasse
LED	Light Emitting Diode (Leuchtdiode)
LiPo	Lithium-Polymer
mag	magnetisch
MGM	Magnetgreifermodul
PDI	Program and Debug Interface
PET	Polyethylenterephthalat
POM	Polyoxymethylen
RCB	rolled legged, continuous footed, big footed
RCL	rolled legged, continuous footed, little footed

Abkürzung	Erklärung
RDB	rolled legged, discrete footed, big footed
RDL	rolled legged, discrete footed, little footed
RM	Rotationsmodul
ro	rotatorisch
SCB	swinged legged, continuous footed, big footed
SCL	swinged legged, continuous footed, little footed
SDB	swinged legged, discrete footed, big footed
SDL	swinged legged, discrete footed, little footed
TTL	Transistor-Transistor-Logik
UGM	Unterdruckgreifermodul
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VDI	Verband deutscher Ingenieure

KAPITEL 1

Einleitung

„Es genügt eben nicht, dass Technik gut funktioniert. Sie muss auch in die Welt passen.“

Gero von Randow

1.1 Motivation

Robotersysteme verändern immer mehr unseren Alltag. Neben ihren vielfältigen Anwendungen als stationäre Systeme in der Industrie gibt es eine schnell steigende Zahl mobiler Roboter. Sie werden zunehmend nicht nur in für sie geschaffenen Umgebungen eingesetzt, sie müssen auch in Alltagssituationen agieren. Ihre Unabhängigkeit vom Nutzer stellt ein zentrales Ziel dar. Diese setzt voraus, dass Roboter sich intensiver mit ihrer Umwelt auseinandersetzen und auf multiple Reize reagieren können. So werden sie immer mehr zu autonomen Akteuren.

Die neuzeitliche Literatur beschäftigt sich mit dieser Thematik, beflügelt von dem alten Traum der Schaffung künstlicher menschenähnlicher Maschinen. Douglas Adams beschreibt Roboter als „Roboter: eine technische Vorrichtung, die dazu dient, dem Menschen die Arbeit abzunehmen [Adams et al. 2004].“ Der Begriff „Roboter“ geht auf den Roman „W.U.R.“ des tschechischen Schriftstellers Karel Capek (vgl. [Capek 1922]) zurück und heißt im westslawischen Sprachgebiet so viel wie „Fronarbeit“. Es werden damit primär menschenähnliche Maschinen bezeichnet, die dem Menschen die Arbeit erleichtern [Ichbiah 2005]. Heute wird der Begriff nicht nur auf anthropomorphe Systeme bezogen, sondern deutlich weiter gefasst.

Roboter lassen sich in lokomobile und loko-immobile System einteilen – Kletterroboter stellen eine Form lokomobiler Systeme dar. Aktuelle Kletterroboter sind individuelle Spezialisten. Die mechanischen und elektronischen Teilkomponenten sowie die Steuerung sind auf die Fortbewegungsform des Kletterns auf einem speziellen Substrat optimiert (vgl. Kap. 2.2). Schon relative geringe Änderungen der Eigenschaften des Substrats in Form oder im Material stellen bisherige Roboter in den meisten Fällen vor unlösbare Aufgaben; die leichten Änderungen werden zu Lokomotionshindernissen. Beispielsweise sind Robo-

tersysteme zur Glasfassadenreinigung, welche zumeist mit Unterdruckhaftsystemen, so genannten Sauggreifern, ausgestattet sind. Diese erzeugen in Kombination mit der glatten und ebenen Oberfläche ausreichende Haftkräfte. Soll der Roboter dagegen einen Abschnitt mit rauer Betonfläche überwinden, versagen diese Haftstrukturen.

1.1.1 Klettern in der Natur

Viele Tiere zeigen faszinierende Fähigkeiten beim Klettern, scheinbar spielend klettern sie an Felswänden, Bäumen oder Grashalmen. Inspiration bei der Entwicklung leistungsfähiger Kletterroboter können Ingenieure z. B. durch die Untersuchung der bei Organismen vorkommenden Haft- und Greiforgane gewinnen.

Folgt man der Argumentation in [Witte et al. 2004], sollten biomimetische Roboter auf Grundlage der Funktionellen Morphologie entwickelt werden. Notwendig, aber nicht hinreichend, ist das Verständnis für den Aufbau und die Funktion biologischer Strukturen und deren Wechselbeziehungen. Erst auf dessen Grundlage kann man den natürlichen Gestaltungsbildungsprozessen zugrunde liegende Prinzipien in den Bereich der Ingenieurwissenschaften transferieren und diese Funktionen auf technische Systeme übertragen. Für die Ingenieure sehen [Zimmermann et al. 2009, S. 5] eine große Herausforderung in einer solchen Entwicklung von material- und energiesparenden Transportsystemen und somit auch von mobilen Robotern.

Es gibt zahlreiche Untersuchungen der Lokomotion und des Greifens bei Vertebraten und Invertebraten. In [Gladun et al. 2007] ist dargestellt, dass Insekten beim Klettern auf zylindrischen und ebenen Substraten verschiedene Greifprinzipien einsetzen. Viele Insekten besitzen unterschiedliche, Haftung erzeugende Systeme an ihren Extremitäten, die je nach Anforderungen eingesetzt werden. Die Auswahl eines Haftorgans erfolgt dabei oft nicht gezielt sondern mechanisch. Es liegen keine komplexen neuronalen Aktivitäten zugrunde, allein die kinematische Struktur des Tieres in Kombination mit den physikalischen Eigenschaften der unterschiedlichen Haftflächen sorgt für einen sicheren Kontakt zwischen Tier und Substrat als Haftpartner. In der Robotik wird dieser „Preflex“ als „intelligente Mechanik“ (intelligent mechanics) bezeichnet. Es kommt sowohl substratumgreifende, einhakende (krallenbasierte) als auch adhäsive Haftung vor. In [Voigt et al. 2007] ist dargestellt, wie die Substrateigenschaften, speziell die Oberflächeneigenschaften die Stärke der Haftung maßgeblich determinieren.

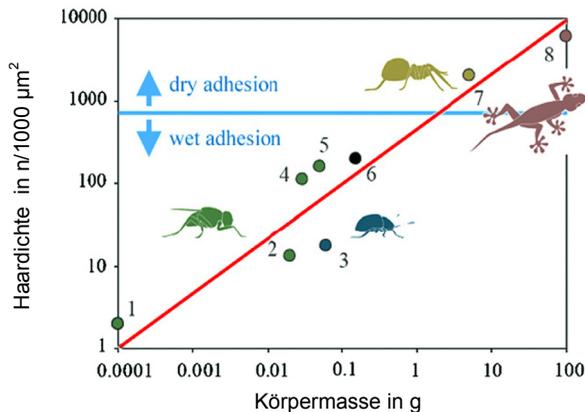


Abb. 1 – Haardichte in Abhängigkeit der Körpermasse. Beobachtungen lassen darauf schließen, dass die Masse der Tiere einen entscheidenden Einfluss auf das adhäsionsbasierte Haften verschiedener Organismen hat. Geckos sind die schwersten bisher als „Adhäsionskletterer“ identifizierten Tiere mit einer maximalen Masse von etwa 100 g. Zu beobachten ist ein Übergang zwischen feuchter und trockener Adhäsion bei einer Körpermasse von etwa 2 g. (Bildquelle: [Gorb et al. 2007])

Bei Vertebraten gibt es ebenfalls eine große Variation in den Haftung erzeugenden Prinzipien. Auch hier kommt adhäsive Haftung vor, wie beispielsweise bei Geckos. Allerdings gibt es eine Begrenzung der Masse; Adhäsion ist bei Tieren mit einer Masse bis 100 g zu beobachten (vgl. [Gorb 2008], S. 966).

Abhängig von der Körpermasse dominiert entweder trockene oder nasse Adhäsion. Bei Organismen mit einer Körpermasse von mehr als 2 g ist fast ausschließlich trockene Adhäsion zu beobachten (vgl. Abb. 1).

Ist die Masse größer als 100 g, dominieren mechanische Haftprinzipien wie das Greifen oder Krallen (vgl. Abb. 2). Beispielgebend als Greifkletterer sind Chamäleons (vgl. [Fischer et al. 2009]) und Halbaffen (vgl. [Preuschoft et al. 1995]). Als Krallenkletterer sind beispielsweise Nagetiere zu nennen.

Beim Vergleich technischer Haftprinzipien mit biologischen fällt auf, dass in technischen Systemen zusätzlich zur Adhäsion und zum Greifen wie in der Biologie auch beispielsweise feld- und strömungsbasierte Technologien umgesetzt werden. Deren physikalische Grundlage ist in Organismen nicht gegeben. In viele Entwicklungen technischer Greifer sind jedoch biologische Inspiratio-

nen eingeflossen – sei es als Versuch des Nachbaus biologischer Prinzipien (Biomimikry) oder als Prinzipübertragung (Bionik). Als Beispiele hierfür seien der „FinGripper“ der Fa. FESTO AG (vgl. [Festo AG & Co. KG 2009]) und der pneumatisch aktuierte Greifer nach Vorbild des Spinnenbeins (vgl. [Zentner et al. 2005]) genannt.



Abb. 2 – Haft- und Greiforgane in der Natur. Links: Haftorgane des *Gastrophysa Viridula*, Mitte: Chamäleon als Greifkletterer, rechts: Krallenkletterer (Bildquelle: [Gorb et al. 2007], Danja Voges)

Viele biomechanische Studien biologischer Kletterer untersuchen deren Kinetik. Beispielhaft seien hier kleine Säugetiere [Schmidt 2005], [Nyakatura et al. 2007] oder Reptilien [Lilje 2005] genannt. Die Lokomotionsform ändert sich beim Klettern auf einem beliebig im Raum orientierten Substrat. Auch gibt es je nach Orientierung des Substrats unterschiedliche Anforderungen an die Morphologie des Tieres.

Des Weiteren verändern sich die Bewegungsmuster mit stärker steigendem Substrat von symmetrischen hin zu asymmetrischen Gangmustern wie Stemmklettern (vgl. [Preuschhof 2002]). Dabei ist die Dynamik nur ansatzweise untersucht. In aktuellen Untersuchungen (vgl. [Andrada et al. 2010]) deutet vieles darauf hin, dass das „Klettern“ einer Ratte (*rattus norvegicus*) auf einen flachen zylindrischen Substrat dem Laufen sehr ähnlich ist. Bei steigender Neigung des Substrates ist ein Übergang zu einem anderen Bewegungsmuster zu beobachten. Die dynamische Komponente der Substrateaktionskräfte tritt bei höherer Steigung (größer 60° Neigung) immer mehr in den Hintergrund. Es ist ein quasistatisches Klettern zu beobachten, welches vermutlich durch die äußeren Kräfte erzwungen ist.

1.1.2 Zielstellung

Ein grundsätzliches Verständnis des Kletterns aus biologischer Sicht ist noch nicht vorhanden. In der Technik gibt es eine Vielzahl verschiedener, hoch

spezialisierten Klettersysteme. Um das allgemeine Verständnis des Kletterns zu erhöhen, ist der Bedarf an einem generalistischen Kletterroboter gegeben. Dieser setzt voraus, dass sowohl unterschiedliche Haft- und Greifprinzipien als auch verschiedene kinematische Grundstrukturen des Roboters realisiert werden können.

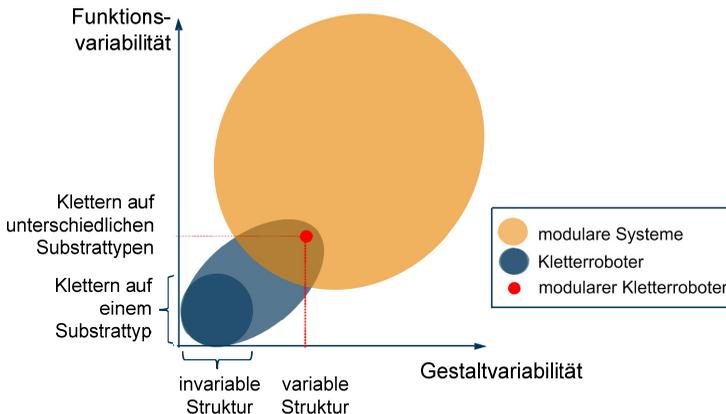


Abb. 3 – Aktuelle Kletterroboter vs. modulare Systeme. Aktuelle Kletterroboter sind funktionelle Spezialisten mit einer invariablen Struktur. Modulare Systeme können funktionell angepasst werden indem Module zu unterschiedlichen Strukturen rekombiniert werden. Ein modularer Kletterroboter besäße eine höhere Funktionsvariabilität basierend auf der Gestaltvariabilität.

Erste Versuche, modulare Roboter als Kletterroboter einzusetzen, sind in [Ranasinghe et al. 2007] dargestellt. Hier wurde eine Konfiguration des Systems SUPERBOT (vgl. Kap. 2.4) um Greifer erweitert, mit denen eine Lokomotion an einem Seil horizontal und vertikal möglich war. Dieser Ansatz ist viel versprechend und soll mit einem für eine Vielzahl von Greifprinzipien optimierten modularen System verfolgt und erweitert werden. Da das System SUPERBOT nicht kommerziell verfügbar ist, besteht die Notwendigkeit der Entwicklung eines eigenen modularen Systems, welches die funktionelle Eigenschaft des Kletterns mit der strukturellen Eigenschaft der Modularität verknüpft (siehe Abb. 3).

Die Aufgabe der Entwicklung eines modularen Kletterrobotersystems ist als Entwicklung eines mechatronischen Systems nach Richtlinie VDI 2206 darstellbar. Eine Analyse aktueller Greif- und Haftprinzipien und

Lokomotionsformen aktueller Kletterroboter anhand des Standes der Technik, die Klassifikation und Bewertung sollen am Anfang der Arbeit stehen. Notwendig dafür ist die Klassifikation aktueller Kletterrobotersysteme einerseits anhand ihrer Wirkpaarung und andererseits anhand ihrer Lokomotionsform. Aus dieser systematischen Betrachtung werden die grundlegenden technischen Eigenschaften wie Masse, Größe und Funktionen der Module abgeleitet.

Die Entwicklung des modularen Systems geht von einem modellbasierten Referenzsystem aus. Anhand dessen werden unterschiedliche Modularisierungsvarianten untersucht und bewertet. Dabei ist dem modularen Aspekt besondere Beachtung zu schenken und dieser in den Entwicklungsprozess einzubinden. Dazu muss das modulare System auf die Erfordernisse der Kletterrobotik abgestimmt werden. Für die optimale modulare Variante werden die Schnittstellen abgeleitet. Exemplarisch werden Module entwickelt, gefertigt und getestet.

Aus den entwickelten Modulen wird ein funktionsäquivalentes Vergleichssystem aufgebaut und experimentell untersucht. Zur Bewertung des modularen Systems steht der Kletterroboter RATNIC zur Verfügung, der als integrierte Lösung eine adäquate Referenz darstellt. Hierfür werden zum Vergleich der Leistungsfähigkeit quantitative Parameter beider Systeme bestimmt.

1.2 Definitionen

1.2.1 Klettern

Als Klettern wird eine Form der Fortbewegung bezeichnet. Die Bewegung findet im Schwerfeld der Erde statt. Dabei kann die Bewegungsrichtung, orientiert am Schwerkraftvektor, beliebig sein. In der Literatur wird Klettern verschieden definiert. In [Simons 2006, S. 21] wird das Klettern vom Laufen über das Verhältnis zwischen der dabei wirksamen Haftreibungskraft und der senkrecht auf das Substrat wirkenden Normalkraft unterschieden. Ist die Haftreibungskraft kleiner als die Hangabtriebskraft, spricht man vom Klettern; ist sie größer, von Laufen oder Fahren.

[Cartmill 1985, S. 73] definiert Klettern ebenfalls über die Reibkraft und ergänzt, dass beim Klettern zusätzlicher „Aufwand“ betrieben werden müsste, um den Kontakt zum Substrat zu erhalten. Die Definition in [Preuschhof et al. 1998] sieht Klettern als Fortbewegung auf steil ansteigenden bis hin zu vertikalen Substraten und durch das Setzen einer Reihe von Hand- und Fußkontakten

auf unterschiedlichen Höhen. Klettern impliziert einen Höhengewinn oder Höhenverlust des Massenschwerpunkts in Relation zu einem raumfesten Punkt. Das Klettern geht somit mit einer Veränderung der potentiellen Energie des Körpers im Schwerfeld jenseits kurzfristiger periodischer Schwankungen einher.

Eine Definition des Kletterns über die Reibung erscheint sinnvoll. Das Klettern kann in beliebige Richtungen des Raumes erfolgen, es ist nicht notwendigerweise mit dem Erreichen eines Netto-Höhenunterschieds des Massenschwerpunkts verknüpft. Eine Veränderung des Höhenunterschieds kann auch beim Laufen auf geneigten Boden erfolgen. Des Weiteren kann Klettern schwer über kinematische Größen ausgedrückt werden.

Für diese Arbeit erfolgt die Definition des Kletterns wie folgt:

„Klettern ist eine Fortbewegungsart. Sie ist an ein Festkörpersubstrat gebunden. Die Richtung des Kletterns ist dabei beliebig, die Bewegung kann aufsteigend, absteigend oder unter Erhaltung der Höhe durchgeführt werden. Es werden zur Aufrechterhaltung des Substratkontakts mehr als die zur Substratoberfläche normale Komponente der Gewichtskraft und die daraus resultierenden Reibungskräfte benötigt.“

1.2.2 Robotik

(Loko-)Immobile Systeme werden häufig als Industrieroboter bezeichnet. Sie sind unbeweglich mit der Umgebung verbunden und somit ortsfest. Sie sind nicht zur Fortbewegung geeignet. Sie sind ausschließlich zur Idiomotion fähig, welche nach [Witte et al. 1999] definiert wird als eine auf das System bezogene Bewegung ohne eine dauerhafte Schwerpunktverlagerung über eine Aufstandsfläche hinaus.

In [NORM VDI 2860, 1990] werden Industrieroboter wie folgt definiert:

„Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d. h. ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsarbeiten ausführen.“

Im Gegensatz zu immobilen sind mobile Roboter zur Lokomotion fähig. Fortbewegung oder auch Lokomotion ist nach [Witte et al. 1999] „eine Bewegung im Raum mit dauerhafter Schwerpunktverlagerung.“

Ein mobiler Roboter ist beispielsweise nach [Hoppen 1992, S. 34] eine

„...Maschine, die sich in einer natürlichen Umgebung aus eigener Kraft und ohne Hilfestellung von außen bewegen und dabei ein ihr gestelltes Ziel erreichen kann.“

Eine integrale Sichtweise der Roboter ist in [Pfeifer 1999] zu finden. Dabei zeichnen sie sich als autonome Akteure durch verschiedene, voneinander abhängige Merkmale bezüglich ihres Verhaltens aus:

- Selbsterhalt (self-sufficiency),
- Selbstgewissheit (situatedness),
- Leibhaftigkeit (embodiment),
- Anpassungsfähigkeit (adaptivity),
- Autonomie (autonomy).

Unter Selbsterhalt kann hierbei das Ziel des Akteurs verstanden werden, sich über einen bestimmten Zeitraum zu erhalten und seine Aufgabe zu erfüllen. Er beinhaltet verschiedene Aspekte wie die Versorgung mit Energie ohne äußere Unterstützung, die Vermeidung von Beschädigung und den Erhalt der aufgabenbezogenen Funktionalität.

Unter der Selbstgewissheit wird die Eigenschaft verstanden, die Umwelt nur aus ihrer eigenen Perspektive wahrzunehmen und in ihr angepasst zu agieren, gegebenenfalls sie zielgerichtet zu beeinflussen. Damit sind sowohl Interaktionen mit den unbelebten, präformierten Umwelt wie auch mit anderen organismischen und technischen Akteuren gemeint.

Autonomie hat zwei Aspekte: die Unabhängigkeit von der Situation und die Unabhängigkeit von anderen Akteuren. Wenn der Begriff „Autonomie“ verwendet wird, ist die Freiheit von externer Steuerung gemeint. Vollständig autonome Systeme gibt es nicht. Es gibt immer nur einen gewissen Grad von Autonomie.

Akteure sind real und physisch, also leibhaftig. Sie müssen mit ihrer Umwelt physisch interagieren. Damit unterliegen sie physikalischen Gesetzmäßigkeiten wie Kräften, Energiedissipation, jeder weiteren Art von Umwelteinflüssen. Das Verhalten eines solchen Akteurs ist somit sowohl durch seine kognitiven als auch durch seine mechanischen Eigenschaften eingeschränkt.

Adaptivität ist die Fähigkeit, sich an eine komplexe und unbekannte, nicht in allen Faktoren antizipierte Umgebung anzupassen und in dieser zu agieren. Dabei kann in verschiedene Arten von Adaptivität unterschieden werden (vgl. [Brooks 1986]):

- Evolutionäre Adaptivität – Anpassung an Umweltänderungen, welche in Zeitperioden mit einer Dauer von Jahren stattfinden
- Physiologische Adaptivität – Anpassung an und durch physiologische Prozesse. Die Zeitspanne ist hierbei in Bereich von Minuten oder Sekunden.
- Sensorische Adaptivität – Anpassung der Sensoren an die Reizstärke, welche detektiert wird. Die Dauer solcher Prozesse liegt im Bereich mehrerer Sekunden.
- Adaptivität durch Lernen – Die Fähigkeit sich durch Änderung des Verhaltens an verschiedene Veränderungen in der Umwelt anzupassen. Diese Prozesse dauern wenige Sekunden bis Jahre.

Grundsätzlich sollen in mobilen Robotern alle Merkmale vorhanden sein. Auch für die Entwicklung eines modularen Kletterroboters müssen die Merkmale als Anforderungen berücksichtigt sein, auch wenn sie im Rahmen dieser Arbeit nicht alle umgesetzt werden können.

1.2.3 Definition Greifen, Greifer und Wirkpaarung

In der Kletterrobotik kommt dem so genannten Haftmechanismus eine besondere Bedeutung zu. In der Automatisierungstechnik hat sich der Begriff Greifer durchgesetzt, welcher auch im Rahmen dieser Arbeit orientiert an [Hesse 2004, S. 2] wie folgt definiert wird:

„Greifer sind Teilsysteme von Handhabungseinrichtungen, die einen zeitweiligen Kontakt zu einem Greifobjekt herstellen. Sie sichern Position und Orientierung gegenüber der Handhabungseinrichtung. Das Halten wird mit krafterzeugenden, form- und stoffschließenden Elementen erreicht. Der Begriff „Greifer“ wird auch dann benutzt, wenn im Sinne des Wortes nicht gegriffen sondern gehalten wird, wie zum Beispiel bei Vakuumsaugern. Die Haltekraft kann punktuell, linienartig oder flächig einwirken.“

Der Begriff „Greifen“ wird logisch folgend somit auch dann angewendet, wenn es sich umgangssprachig um ein Halten, Haftens, Saugen oder ähnliches handelt (vgl. [Lehmann 2008, S. 5]). Des Weiteren wird in der Handhabungs-

technik der Begriff „Greifobjekt“ oder „Objekt“ für jeden Körper benutzt, mit dem der Greifer während des Greifprozesses in Interaktion ist. Für das Klettern wird der Begriff nicht verwendet, da es sich beim Greifobjekt während der Lokomotion immer um das Substrat handelt. In der Biologie wird der Begriff „Substrat“ (lat. „das darunter Gelegene“) oder der englische Begriff „substrate“ für das Medium benutzt, auf dem geklettert wird. (vgl. [Preuschhof et al. 1994], [Arms et al. 2002]). In Bezug auf die Lokomotion ist der Begriff „Substrat“ eindeutig. In Bezug auf das Greifen soll noch die „Wirkpaarung“ nach [Hesse 2004, S. 23] wie folgt definiert sein:

Eine Wirkpaarung besteht aus zwei aufeinander wirkenden Medien auch verschiedenen Aggregatzustands, z.B. Festkörpern oder einem Fluid und einem Festkörper. Es findet eine Energieübertragung von einem Medium auf das andere statt.

1.2.4 Definition Kletterroboter

Kletterrobotersysteme müssen neben der Lokomotion eine Vielzahl von Aufgaben erfüllen. In Anlehnung an [Dudek et al. 2000], [Albiez 2007, S. 3] und [Schmierer 2001] können sie als eine Kombination aus verschiedenen Teilsystemen mit den in Tab. 1 dargestellten Teilaufgaben betrachtet werden.

Tab. 1 – Aufgaben und zugehörige Teilsysteme eines Roboters

Aufgabe	Teilsystem
Bewegungsgenerierung	Bewegungssystem
Substratkontakt	Greifer, Effektorik, Integument (Hülle)
Reizaufnahme	Sensorik
Datenaustausch mit Benutzer	Kommunikationssystem
Energieversorgung	Energiesystem
Verhaltensbestimmung (Reasoning) und Basissteuerung	Steuerungssystem
Navigation	Navigationssystem

Aus diesen unterschiedlichen Aspekten der Robotik lässt sich für Kletterroboter zusammenfassend folgende Definition ableiten:

„Ein Kletterroboter ist ein mobiler Roboter, der zur an ein Festkörpersubstrat gebundenen Lokomotion im Schwerfeld der Erde fähig ist. Das Substrat kann dabei

beliebig im Raum orientiert sein. Zum Substratkontakt verfügt er über ein oder mehrere Haftsysteme, so genannte Greifer. Diese nutzen zusätzlich zur Gewichtskraft weitere physikalische Effekte zur Erzeugung einer anziehenden Kraftwirkung zwischen Roboter und Substrat. Als teilautonomes System kommuniziert ein Kletterroboter mit einem Nutzer, reagiert aber selbständig auf eine begrenzte Anzahl äußerer Reize.“

1.2.5 Modulare Robotik

Als Modularisierung bezeichnet man die Aufteilung eines Systems in einzelne topologisch abgrenzbare Funktionseinheiten, so genannte Module, sowie die Spezifikation der Wechselwirkung zwischen den Modulen. Die Module eines Systems sind somit voneinander abhängig. Sie sind über Schnittstellen in den Domänen Mechanik, Elektrotechnik und/oder Informationstechnik verbunden und an diesen definiert reversibel trennbar.

Für die modularen Roboter gilt:

Ein modularer Roboter ist aus Modulen aufgebaut. Eine Kombination der Module ist ausschließlich über eine oder mehrere definierte Schnittstellen zu anderen Modulen möglich. Die Kombination kann mit Hilfe extramodularer Koppelemente erfolgen.

KAPITEL 2

Kletterrobotik

„Aber wer je mit der Erde zu tun hatte, hat den Menschen bald abgelernt, dass nur das Systematische mit Nutzen bei ihnen betrieben werden könne.“

Wilhelm Hauff

2.1 „Ökologische“ Betrachtungen der Kletterroboter

Die physischen Anforderungen werden bereits zu Beginn des Konstruktions- und Entwicklungsprozess bestimmt. Als Konsequenz ergibt sich, dass man sich bereits zu Beginn des Entwicklungsprozesses intensiv mit der Umwelt des Roboters auseinander zu setzen hat, um Anforderungen für den Entwicklungsprozess ableiten zu können.

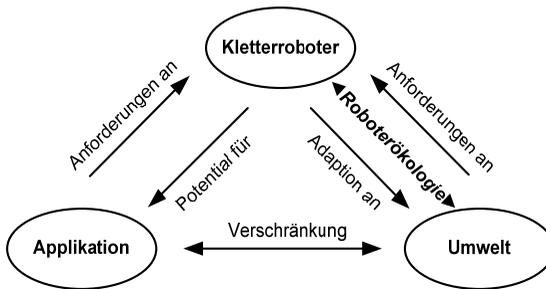


Abb. 4 – Einordnung der Roboterökologie. Es besteht eine trilaterale Abhängigkeit zwischen dem Kletterroboter, der zu erfüllenden Applikation und der Umwelt, in der er agieren muss.

Roboter werden durch ihre Umwelt in ihrem Verhalten bestimmt. Was zur Umwelt zugehörig ist, ist allein durch eine Ursache-Wirkung-Beziehung definiert. Begrifflich ist die Umwelt damit von der Umgebung, welche Dinge in räumlicher Nähe beschreibt, zu trennen. Das Untersuchen der Wechselbeziehungen zwischen einem Organismus und seiner Umwelt ist in der Biologie Gegenstand der Ökologie [Treppl 2005, S. 106].

Ein weiterer Aspekt ist der Zweck des Einsatzes des Roboters. Er ist Träger einer Applikation, er soll eine Aufgabe erfüllen. Die Applikation bestimmt seine Umwelt, diese ist somit durch diesen Einsatzzweck vorausgewählt. Es besteht eine trilaterale Abhängigkeit zwischen Roboter, Umwelt und Applikation (vgl. [Mämpel et al. 2009]), wie in Abb. 4 dargestellt.

2.1.1 Ökologie und ihre Einteilung

Für die Entwicklung von Robotern ist es notwendig, die Wechselwirkungen der technischen Systeme mit ihrer Umwelt qualitativ und möglichst auch quantitativ zu antizipieren. Diese Betrachtungsweise ist in [Schilling 2009] als „Roboterökologie“ eingeführt.

Unter Ökologie versteht man ein Teilgebiet der Biologie, welches sich mit den Wechselbeziehungen der Organismen untereinander und mit ihrer abiotischen Umwelt beschäftigt. Innerhalb der Ökologie wird in Autökologie, Populationsökologie und Synökologie unterschieden. Die Autökologie befasst sich mit den von anderen Lebewesen und von der nicht lebenden Umwelt ausgehenden Einflüssen auf Individuen einer Art. Die Populationsökologie betrachtet quantitative Aspekte innerhalb einer Gruppe gleichartiger Individuen. Die Synökologie untersucht die Wechselwirkungen zwischen Populationen verschiedener Arten [Trepl 2005, S. 26].

Diese Wechselwirkungen werden als biotische bzw. als abiotische Faktoren bezeichnet. Biotische Faktoren stammen aus der belebten Umwelt wie Konkurrenz, Symbiose, Parasitismus und eine Räuber-Beute-Beziehung. Abiotische Faktoren sind mechanischer, chemischer, klimatischer, geologischer, fluidischer oder mechanischer Natur.

Im Folgenden soll die autökologische Betrachtungsweise als Ausgangspunkt der Entwicklung eines Roboters diskutiert werden. Dabei steht dieser biozentrierten Sichtweise die techno-, bzw. ingenieurzentrierte Sichtweise gegenüber.

2.1.2 Wechselwirkungen zwischen Robotern und ihrer Umwelt

Wie schon dargestellt, interagieren Roboter mit ihrer Umwelt. Sie verrichten Arbeit und übertragen dabei Energie. Informationen werden in Form von Sensorsignalen aufgenommen, und auch stoffliche Interaktion durch Aufnahme oder Abgabe von Substanzen ist möglich. Auch in der Robotik sind Analoga zu den biotischen und abiotischen Wechselwirkungen zu unterschei-

den. Vorgeschlagen wird das Begriffspaar „robotisch“ und „arobotisch“, um der robozentrischen Sichtweise genüge zu tun.

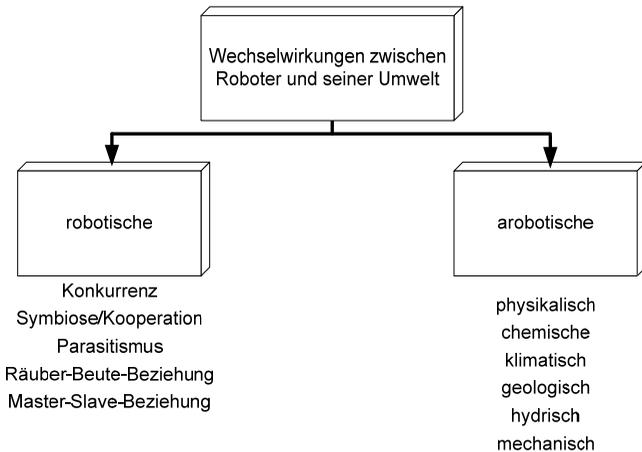


Abb. 5 – Wechselwirkungen zwischen einem Roboter und seiner Umwelt

Eine nutzbare Wechselwirkung muss über einen hinreichend langen Zeitraum gegeben sein. Nur dann kann sie als Eingangsgröße in den Konstruktionsprozess als Anforderung qualitativ oder quantitativ eingehen. Sie wird als Gegebenheit bezeichnet. Kurzfristig auftretende Änderungen von Faktoren werden analog zur Technik als Störungen, die entsprechenden physikalischen Größen werden als Störgröße bezeichnet. Auch diese Störgrößen müssen in den Anforderungen des Entwicklungsprozesses berücksichtigt werden. Das Ziel hierbei sollte sein, viele mögliche Deviationen zu antizipieren.

Die Tab. 2 enthält eine Auflistung der als relevant eingeschätzter Umweltfaktoren. Dabei ist festzustellen, dass die robotischen Faktoren in den Hintergrund treten, bedingt durch zumeist anthropogene Applikationsfelder von Kletterrobotern. Konkurrenz, Symbiose und Räuber-Beute-Beziehung bei Robotern stehen nicht im Mittelpunkt der Betrachtung, doch sind sie beispielsweise Gegenstand der Forschung in der Schwarmrobotik. Arobotische Faktoren dominieren. Elemente der Roboterökologie sind chemisch-klimatischer, anthropogener, physikalischer, physisch-topographischer und mechanischer Natur.

Tab. 2 – Physisch-topografische und physische Umweltfaktoren für Kletterroboter

Faktor	Gegebenheit - Nutzgröße	Störgröße
Substratgeometrie	Form	Beschädigungen, sprunghafte Änderungen
	Maße	
Substratlage	Orientierung im Schwerfeld	
Substratoberfläche	Rauigkeit	Verschmutzung
Substratmaterial	Duktilität	Materialfehler
	Visco-Elastizität	
	Härte	
Umgebende Strukturen	Mindestabstand zur nächsten Struktur	Hindernis in Bewegungsrichtung
		Verengung
Atmosphäre	Strömungsverhältnisse	Kritische Veränderung der Strömung
	Dichte	Kondensation
	Temperatur	Veränderung von Haft Eigenschaften
	relative Luftfeuchte	
Schwerfeld der Erde	Schwerkraft ist nutzbar für Substratkontakt	Wechsel des Orientierung des Schwerkraftvektors im roboterfesten Koordinatensystem
	Schwerkraft ist nutzbar für die Bewegungsunterstützung	

Für die Lokomotion von Robotern sind die topographischen Gegebenheiten und Störungen entscheidende Faktoren. Sie beschreiben das Medium, mit dem der Roboter in Wechselwirkung tritt, um die Lokomotion durchzuführen. Ein Kletterroboter tritt mit dem Substrat, umgebenden Strukturen und den ihn umgebenden Medium, also der Luft, in Kontakt. Die Differenzierung der Faktoren soll helfen, die Einflussparameter zu identifizieren. Diese sind gleichermaßen bei der Anforderungsanalyse des Konstruktionsprozesses zu berücksichtigen.

Tab. 3 – Einfluss der Substrateigenschaften im Entwicklungsprozess

Substrat-bezogene Größen		Greifer	Bewegungs-system	Energiesystem	Kommunikation	Steuerung	Sensorsystem	Navigations-system
Nutzgrößen	Maße	●	●	○	○	◐	◐	○
	Form	●	●	○	○	◐	◐	◐
	Duktilität	●	●	○	○	●	◐	○
	Elastizität	●	●	○	○	●	●	◐
	Härte	●	●	○	○	◐	◐	○
	Orientierung im Schwerfeld	●	●	◐	○	●	◐	◐
Störgrößen	Materialfehler	●	●	○	○	●	◐	○
	Beschädigungen des Substrats	●	●	○	○	●	◐	○
	Verschmutzung	●	●	○	○	●	◐	○

● großer Einfluss ◐ partieller Einfluss ○ kein Einfluss

Nutzbare Größen beeinflussen Teilkomponenten des Roboters, wie sie in Kap. 1.2.3 aufgeführt sind. In Tab. 3 ist die Wechselwirkung zwischen den topografischen Faktoren, getrennt in ihre Ausprägung als Nutz- oder als Störgröße, und den Teilsystemen des Roboters dargestellt.

Deutlich wird ein starker Einfluss auf den Konstruktionsprozess des Bewegungssystems und des Greifers durch die Substrateigenschaften. Notwendig für den Entwicklungsprozess ist demnach eine Klassifikation der Greifer und der Bewegungssysteme von Kletterrobotern in ihrer Wechselwirkung mit dem Substrat.

Tab. 4 – Vergleich zwischen Greifern von Industrierobotern und Kletterrobotern. Die Unterschiede begründen sich in der Nutzung als einerseits stationäre und andererseits als mobile Systeme. Als Kriterien werden Eigenschaften des Substratkontakts herangezogen. (Darstellung erweitert nach [Fremerey et al. 2008]).

Kriterium	Industrieroboter	Kletterroboter
Kraftübertragung	bestimmt durch die Objektmasse	bestimmt durch die Masse des Roboters
Materialeigenschaften des Substrats/Objekts	bekannte Toleranzen	unbekannte Toleranzen
Orientierung zum Greifer	bekannt, meist nur geringe Abweichung	bekannt oder unbekannt, variiert schwach bis stark
Formeigenschaften des Substrats/Objekts	enge Toleranzen, oft an Greifer angepasst bzw. vice versa	unbestimmt, stark variabel
Interaktionen zw. Greifer und Substrat/Objekt	Halten, Messen, Bearbeiten	Halten
Energieaufnahme für das Greifen	unbegrenzt, da nicht autarkes System	autarkes System mit begrenztem Energievorrat

2.1.3 Vergleich von Handhabungs- und Kletterrobotern

Die Grundlagen, Systematik und Anwendungen der Greifertechnik in der Handhabungstechnik sind ausführlich in [Hesse 2004] dargestellt. Diese Ausführungen beziehen sich auf Industrieroboter, also auf immobile Systeme. Unter anderem gibt eine Richtlinie für den Entwicklungsprozess für Greifer (vgl. [Hesse 2004, S.70]), die ggf. auch für den Entwurf von Greifern für die Kletterrobotik anwendbar ist. Ein Vergleich zwischen den Anforderungen an Greifer für die Idiomotion in der Handhabungstechnik und Greifer für die Lokomotion in der Kletterrobotik ist in Tab. 4 dargestellt.

Hier wird deutlich, dass viele Substrat- respektive Objekteigenschaften ähnlich sind. Deutlich ist der Unterschied bei der Kraftübertragung. Bei den Handhabungssystemen hängen die zu übertragenden Kräfte und Momente vom Greifobjekt ab und werden durch dessen Trägheits- und Gewichtskraft bestimmt. Beim Kletterroboter definiert der Roboter selbst, vorrangig durch die Eigenmasse und die Masseverteilung, die auf den Greifer wirkenden Lasten. Ein weiterer Punkt ist die notwendige Ausführung des Kletterroboters als energieautarkes System. Unter diesem Aspekt ist die Reduktion der Energie,

welche für das Greifen notwendig ist, als zentrales Entwicklungsziel anzusehen. Greifer für die Kletterrobotik müssen toleranter bezüglich Form und Materialeigenschaften des Substrats ausgelegt werden.

2.1.4 Zeitlicher Verlauf des Substratkontakts

Bei einer qualitativen Betrachtung der Fortbewegung können vier zeitliche Phasen des Substratkontakts bezogen auf einen Greifer und das Substrat unterschieden werden. Auch der Greifvorgang ist analog in vier gleiche Phasen aufzuteilen (vgl. [Hesse 2004, S. 20], [Mämpel et al. 2008, S. 208]).

- 1. Phase**
„Positionieren“ Der Substratkontakt zwischen Substrat und Greifer ist vollständig unterbrochen. Der mechanische Freiheitsgrad beträgt $f = 6$. Es ist also keine kinematische oder sonstige physikalische Kopplung zwischen dem Greifer und dem Substrat vorhanden.
- 2. Phase**
„Zugreifen“ Der Substratkontakt wird aufgebaut. Dabei wird der mechanische Freiheitsgrad reduziert. Translatorische und rotatorische Freiheiten werden gleichzeitig oder nacheinander gesperrt. Der Freiheitsgrad am Ende des Vorgangs kann zwischen $f = 5$ und $f = 0$ betragen. Es werden Kräfte und Momente übertragen.
- 3. Phase**
„Halten“ Der Substratkontakt wird aufrechterhalten. Der mechanische Freiheitsgrad bleibt zumeist konstant. In den gesperrten Freiheiten werden Kräfte und Momente übertragen.
- 4. Phase**
„Lösen“ Der Substratkontakt wird aufgehoben. Der mechanische Freiheitsgrad wird erhöht. Die translatorischen und rotatorischen Unfreiheiten werden nacheinander oder zeitsynchron freigegeben. Am Ende des Vorgangs beträgt der Freiheitsgrad zwischen Greifer und Roboter $f = 6$.

2.2 Greifersystematik anhand der Wirkpaarung

2.2.1 Vorbetrachtungen

Um vorhandene Kletterroboter hinreichend genau unterscheiden zu können, müssen Klassifikationen erarbeitet werden. Dabei soll einerseits das Greifen anhand der genutzten physikalischen Effekte und die Lokomotion unter dem Aspekt der Bewegungserzeugung unterteilt werden.

Es finden sich in der Literatur vereinzelt Klassifikationen von Kletterrobotern nach dem Prinzip des Substratkontakts, welche aber uneinheitlich sind. Daher ist es im Rahmen dieser Arbeit notwendig, eine Klassifikation festzulegen. In [Berns et al. 2003] und in [Longo et al. 2008] werden ähnliche Einteilungen getroffen. In [Mämpel et al. 2009] ist eine darauf aufbauende Systematik verwendet. Unterschieden werden die elektrischen Greifer in elektrostatische und magnetische Greifer. Es werden alle fluidbasierten Greifer in einer Klasse zusammengefasst. Des Weiteren werden mechanische und chemische Greifer unterschieden.

- fluidisch – Erzeugung über eine Druckdifferenz
- magnetisch – Kraftwirkung innerhalb eines magnetischen Felds
- mechanisch – Erzeugung der Haftung über Greifer (Kraftschluss) oder Haken (Formschluss)
- chemisch – Ausnutzung chemischer Eigenschaften zur Erzeugung von Kräften
- elektrostatisch – Kraftwirkung innerhalb eines elektrostatischen Felds

Diese Einteilung ist generell geeignet, ist aber nicht konsequent; es werden Begriffe aus unterschiedlichen Bereichen kombiniert. Auch ist die Trennung zwischen elektrostatisch und chemisch nicht eindeutig; sind doch viele Wechselwirkungen auf molekularer oder atomarer Ebene elektrostatischer Natur.

Ein weiterer interessanter Ansatz ist eine Klassifikation unter dem Gesichtspunkt der Greifmethode, dargestellt in [Hesse 2004, S. 23]. Eine Unterscheidung erfolgt hier nach der Methode in

- aneinanderpressend (mechanische Klemmungen),
- eindringend (Haken, Nadeln, Kletteffekt),

- grenzflächenhaftend (Klebstoffe, Kapillarkräfte),
- anhaftende Wirkpaarungen (Elektrostatische und magnetische Paarungen).

Unter aneinanderpressenden und eindringenden Methoden sind ausschließlich mechanische Wirkpaarungen einzuordnen, so liegt der Schluss nahe, dass hier ein Kriterium zur Unterscheidung vorliegt.

Zur Einordnung des als Adhäsion bezeichneten Greifens soll kurz auf die Grundlagen eingegangen werden. Nach [Povh et al. 2009] beruhen alle physikalischen Phänomene auf folgenden vier Wechselwirkungen:

- starken Wechselwirkungen,
- elektromagnetischen Wechselwirkungen,
- schwachen Wechselwirkung und
- Gravitation.

Die meisten der bisher diskutierten physikalischen Effekte beruhen auf elektromagnetischen Wechselwirkungen – so auch die adhäsiven Effekte. Adhäsion wird in [Scherge et al. 2001, S. 21] wie folgt definiert:

„Adhäsion kann als der Zustand minimaler Energie betrachtet werden, der erreicht wird, wenn zwei Festkörper in Berührung gebracht wurden. Das heißt, dass eine gewisse Kraft benötigt wird, um diese zu trennen. (Adhesion can be regarded as a state of minimum energy that is attained when two solids are brought into intimate contact. This means, a certain force is required to separate the solids (...).“

Jene Kräfte, welche zur Adhäsion beitragen, können dabei in vier Gruppen unterschieden werden:

- molekulare Kräfte,
- elektrostatische Kräfte,
- Kapillarkräfte,
- Kräfte durch Ladungsüberschuss.

Molekulare und elektrostatische Kräfte beruhen auf quantenmechanischen Wechselwirkungen wie Van-der-Waals-Kräften. Kapillarkräfte und Ladungseffekte beruhen auf Kontinuumsgrößen. Kapillare Anziehung ist eine komplexe

Wirkung aus Adhäsion, Kohäsion und Oberflächenspannungen des Materials einer Flüssigkeit. Werden zwei Körper in Kontakt gebracht, entstehen mikro- und nanoskopische Zwischenräume, die als Kapillare wirken. Füllen sich diese Kapillaren mit Wasser, erhöhen sich Normal- und Tangentialkraft zwischen beiden Körpern.

Makroskopisch betrachtet können all diese Effekte schwer getrennt werden. Messungen der Anziehungskräfte spiegeln zumeist die Kapillarkräfte wider. Sie beruhen auf den zwischenmolekularen Kräften wie den Van-der-Waals-Kräften, welche durch das Vorhandensein von spontanen oder stabilen Dipolen entstehen. Für die Klassifikation der Greifer sollen diese Effekte gemeinsam den elektrostatischen Kräften zugeordnet werden (vgl. [Scherge et al. 2001]). Diese Einteilung ist grob, soll aber aus ingenieurtechnischer Perspektive genügen.

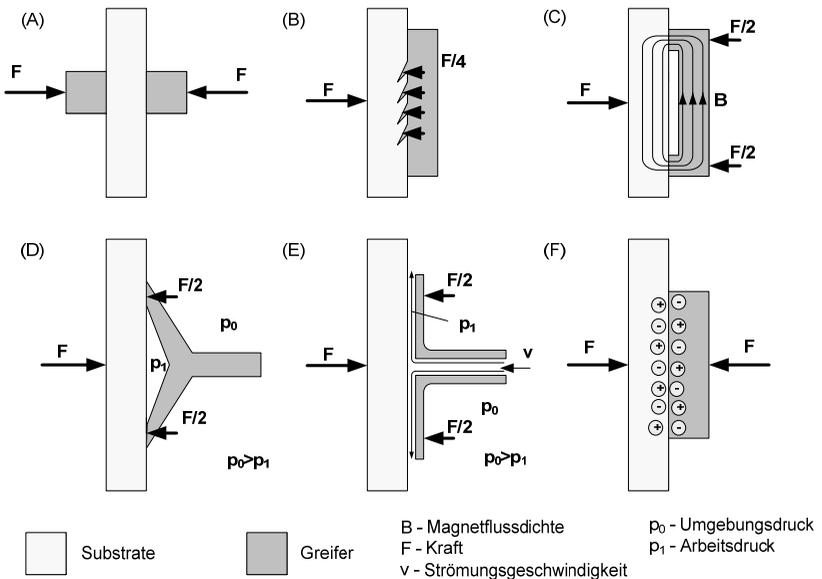


Abb. 6 – Prinzipdarstellungen der Wirkpaarungen. Dargestellt ist jeweils nur die zur Oberfläche normale Komponente der Greifkraft. (A) – mechanisch-anpressend, (B) – mechanisch-eindringend, (C) – magnetisch, (D) – fluidisch statisch, (E) – fluidisch dynamisch, (F) - elektrostatisch

Aus energetischer Sicht interessant ist eine Unterscheidung in aktive und passive Greifprinzipien. Aktiv ist eine Wirkpaarung dann, wenn in der 3. Phase, der Haltephase, eine dauerhafte Leistungsaufnahme des Greifers stattfindet. Passive Wirkpaarungen sind während des Haltens leistungslos. Dieser Aspekt klingt in den verschiedenen Klassifikationen in der Literatur zur Kletterrobotik an, wird aber nicht explizit herausgestellt.

2.2.2 Klassifikation der Wirkpaarung

Aufbauend auf den verschiedenen, bisher dargestellten Klassifikationen sei der Substratkontakt in mechanisch und feldbasiert unterschieden. Feldbasierte Effekte sind anhand des übertragenden Feldes in magnetisch und elektrostatisch unterschieden. Die elektrostatischen Effekte schließen wie Adhäsion, Kohäsion und Kapillarkräfte mit ein. Bei den mechanisch basierten Greifprinzipien wird anhand des übertragenden Mediums in fluidische und Festkörperkopplung unterschieden.

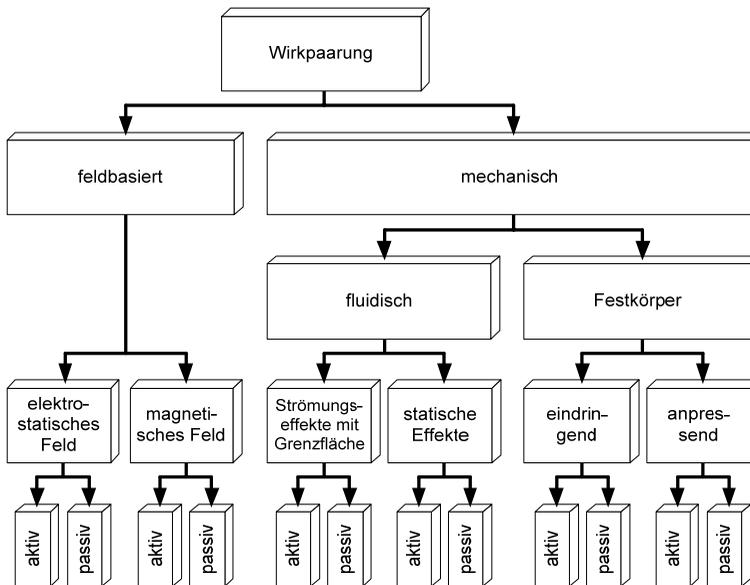


Abb. 7 – Klassifikation des Substratkontakts bei Kletterrobotern. Die Einteilung erfolgt auf drei Ebenen - unterschieden werden die Ausführung der Paarung Haftsystem und Substrat, die Kraftübertragung beim Kontakt und die aktive und passive Leistungsaufnahme beim Haften. Zudem werden aktive und passive Prinzipien in unterscheiden.

Eine weitere Unterteilung der fluidischen Medien in gasförmig und flüssig erfolgt nicht. Bei den Festkörpern wird in eindringende (formschlüssig) und anpressend (kraftschlüssig) unterschieden (vgl. Abb. 6). Alle Effekte können aktiv oder passiv (in der Phase des Haltens) erfolgen. Die Struktur der Klassifikation ist in Abb. 7 dargestellt.

Mit aktiven Prozessen sind diejenigen gemeint, welche in der 3. Phase des Substratkontakts, der Haltephase, Energie benötigen, damit der Substratkontakt aufrechterhalten wird. Nicht berücksichtigt wird, in welcher Form die Energie zugeführt und/oder gewandelt wird. Möglichkeiten sind z. B. elektrisch, thermisch oder chemisch. Passive Prozesse benötigen in der Phase des Haltens keine zusätzliche Energie.

2.3 Fortbewegungssystematik nach Yim

[Yim 1995, S. 32 ff.] liefert eine Fortbewegungsklassifikation für bodengebundene Fortbewegung. Es werden unterschiedliche Gangarten (gaits) der Roboter unterschieden (vgl. Abb. 8). Diese sind nicht an biologischen Gangarten orientiert. Die Fortbewegung wird auf verschiedenen Ebenen klassifiziert. Die erste Ebene unterscheidet in Land, Luft und Wasser, es handelt sich dabei um eine Einteilung der Einsatzgebiete. Diese Ebene ist in Abb. 8 nicht dargestellt. Eine weitere Differenzierung findet auf der zweiten Ebene nur bei der Lokomotion auf dem Land statt. Die zweite Ebene differenziert unter dem Gesichtspunkt der Stabilität in „schwerkraft-stabilisiert (gravitational stable)“ und „allgemein, lage-unabhängig stabil (general stable)“. Yim untersetzt nur den Punkt der schwerkraft-stabilisierten Gangarten und damit terrestrische Lokomotionsarten.

Für die Kletterroboter ist die Schwerkraft per Definition für den Substratkontakt als alleinige Ursache ausgeschlossen (vgl. Kap. 1.2.1). Die Gangarten der Kletterroboter können als lageunabhängig stabil bezeichnet werden.

In der dritten Ebene erfolgt die Klassifikation erfolgt nach:

- Extremitätenbewegung
- Kontinuität des Kontaktes eines Greifers
- Größe des Kontaktpunkts

Der Vorteil dieser Klassifikation liegt in der gleichrangigen Einbeziehung der

beiden Teilsysteme „Bewegungsgenerierung“ und „Greifer“. Die Gangarten werden anhand der Bewegungsgenerierung unterteilt in „vollrotatorisch (rolled)“ und „oszillierend (swinged)“.

Unter einer Vollrotation wird eine rotatorische Bewegung mit einem Winkel von gleich und mehr als 360° verstanden. Als oszillierend gilt dementsprechend eine Rotation mit einem Winkel kleiner 360° . Eine Unterscheidung der Gangarten erfolgt anhand der Kontinuität des Substratkontakts. Hier wird unterschieden in „diskreten (discrete footed)“ und „kontinuierlichen (continuous footed)“ Kontakt. Bei einem kontinuierlichen Kontakt löst der Greifer den Kontakt zum Substrat nie vollständig.

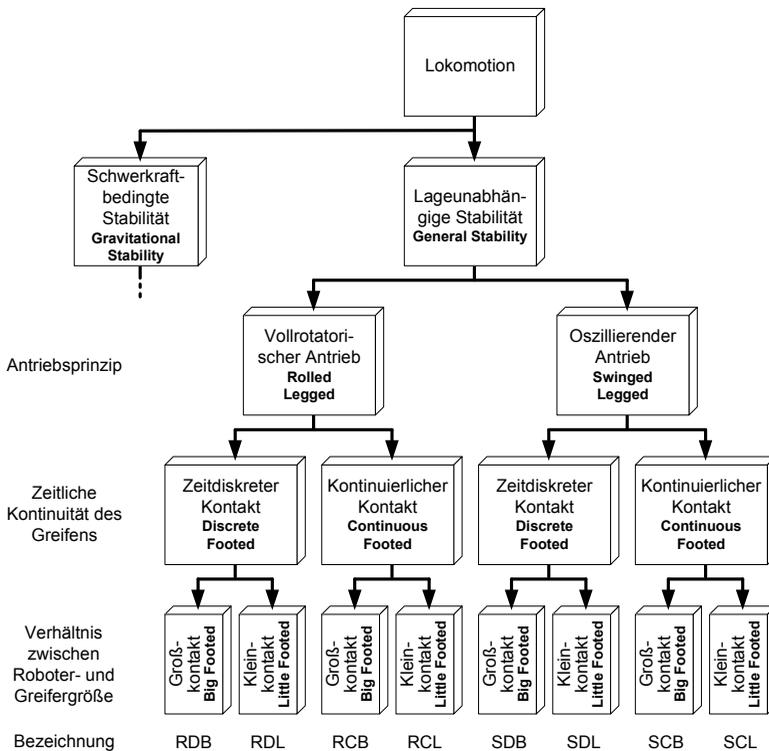


Abb. 8 – Systematik der Bewegungsauskopplung mobiler Roboter (erweitert nach [Yim 1995]).

Alle anderen Kontakte werden als diskret bezeichnet. Die nächste Ebene beschreibt die Beziehung zwischen Stabilität und Greifer. Es werden die Begriffe „Kleinkontakt (little footed)“ und „Großkontakt (big footed)“ verwendet. Eine Gangart ist mit Großkontakt, wenn ein Greifer ausreicht, um eine stabile Fortbewegung zu erzeugen. Die Fläche des Kontakts ist annähernd so groß wie die Grundfläche des Robotersystems. Demnach ist bei einer Gangart mit Kleinkontakt die Kontaktgrundfläche deutlich kleiner als die Hälfte der Robotergrundfläche. Impliziert wird damit, dass bei Fortbewegungsarten mit Kleinkontakt mindestens zwei Greifer notwendig sind, um den Roboter stabil fortzubewegen. Beispiele für Roboter, welche die unterschiedlichen Gangarten umsetzen, werden in [Yim 1995, S. 38] gegeben. Hier sei darauf verzichtet.

2.4 Aktuelle Kletterrobotiksysteme

2.4.1 Eingrenzung des Recherechfeldes

In den letzten Jahrzehnten ist eine Vielzahl von Kletterrobotern entwickelt worden. Vorrangig sind diese Gegenstand universitärer Forschung, nur teilweise finden sich industrielle Anwendungen. Um das Recherechfeld einzugrenzen, werden folgende Einschränkungen getroffen:

1. Der Aktualität geschuldet, werden nur Roboter berücksichtigt, die ab Anfang des Jahres 2000 bis 2010 entwickelt wurden.

Ältere Roboter wie beispielsweise ROBICEN III [Savall et al. 1999] werden somit nicht betrachtet.



Abb. 9 – Beispiele der aus der Systematik ausgeschlossenen Roboter. Diese werden in der Literatur als Kletterroboter bzw. als "climbing robots" bezeichnet, fallen aber aus der Systematik des Kletterns. Links: Roboter RHex - sowohl das Steigen von Treppen als auch des Übersteigen von Hindernissen wird im Englischen als "climbing" bezeichnet. Mitte: Der Roboter „MATS“ benötigt ein mit Infrastruktur versehenes Substrat zum Klettern. Rechts: Der Roboter „Lemur Iib“ ist für spezielle Griffe optimiert (Bildquellen: [Moore et al. 2002], [Kennedy et al. 2006], [Balaguer et al. 2006]).

1. Der Begriff „climbing“ wird in der englischen Literatur weiter gefasst als in der deutschen Sprache der Begriff „Klettern“. So finden sich in der Literatur mit der Schlüsselwortgruppe „climbing robot“ auch Roboter, welche im deutschen nicht als Kletterroboter bezeichnet würden. Dazu zählen Systeme, welche Treppen oder Leitern steigen (englisch: „stair climbing robot“) können.

Ein Beispiel hierfür ist der Roboter RHEX der McGill University in Montreal [Moore et al. 2002]. Auch Systeme, welche zur Überwindung kleiner und mittelgroßer Hindernisse fähig sind, werden als „climbing robots“ bezeichnet. Beispielgebend sind hier die Roboter der WHEGS®-Familie zu nennen (vgl. [Morrey et al. 2003]). Auf diese beiden Gruppen der mobilen Roboter trifft die Definition des Kletterns, wie sie für diese Arbeit getroffen wurde, nicht zu. Hier ist die Gravitationskraft die Haftung erzeugende Ursache. Sie werden demzufolge nicht betrachtet.

2. Außer Betrachtung sind ebenfalls Systeme, welche durch eine boden-gebundene Struktur mechanisch unterstützt werden. Dazu zählen Systeme, deren Last über eine Seil oder ähnliches getragen wird.

Beispiele sind zumeist kommerzielle System wie SKYCLEANER 3 [Zhang et al. 2006] und SIRIUSC [Elkmann et al. 2008].

3. Des Weiteren nicht betrachtet werden Systeme, die eine bestimmte, auf die Greifer des Roboters abgestimmte Infrastruktur benötigen. Dazu zählen Schienen oder spezielle Griffe, die ausschließlich für den Kletterroboter angebracht werden.

Die Roboter LEMUR IIB [Kennedy et al. 2006] und MATS [Balaguer et al. 2006] sind beispielgebend in Abb. 9 dargestellt.

2.4.2 Kletterroboter mit elektrostatischer Wirkpaarung

Im Folgenden werden Kletterrobotersysteme geordnet nach den Wirkpaarungen beschrieben. Eine auf den MINI-WHEGS® basierte Entwicklung wird in [Gorb et al. 2007] vorgestellt. Der Antrieb ist vollrotatorisch. Insgesamt sind 18 Haftstreifen an zwei Achsen angebracht. Antriebe befinden sich an einem starren Rumpf. Mit Hilfe einer Haftfolie aus Polymer mit mikrostrukturierter Oberfläche ist der Roboter in der Lage, eine senkrechte Glasfläche empor zu klettern. Auch eine kurzzeitige Kletterfähigkeit im Überhang konnte nachgewiesen werden. WAALBOT verfügt ebenfalls über einen rotatorischen Antrieb, besitzt aber nur eine Achse mit sechs Greifern [Unver et al. 2006]. STICKYBOT

[Santos et al. 2008] und GECKOBOT [Unver et al. 2006] bewegen sich schreitend fort (vgl. Abb. 10). Auch sie verfügen über Greifer aus mikrostrukturiertem Polymer. Die Kletterfähigkeit wurde ebenfalls auf glattem, ebenem Glas nachgewiesen. Der Roboter TANKBOT [Unver et al. 2009] verfügt über zwei Greifer aus zwei umlaufenden Polymerstreifen mit mikrostrukturierter Oberfläche. Mit dem vollrotatorischen Antrieb konnte eine Kletterfähigkeit auf Glas sowohl vertikal als auch im Überhang nachgewiesen werden. Alle vorgestellten Systeme nutzen passive elektrostatische Adhäsion.

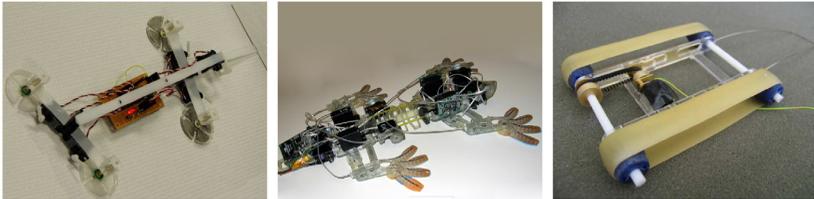


Abb. 10 – Adhäsiv greifende Kletterroboter. Links: GeckoBot, Mitte: Stickybot und rechts: Tankbot (Bildquellen: [Santos et al. 2008], [Unver et al. 2006], [Unver et al. 2009])

Die „aktive elektrische Adhäsion“ ist eine technologische Entwicklung der Fa. SRI, Menlo Park, CA, USA. In [Pralad et al. 2008] werden zwei Roboter mit derartigen Haftelementen vorgestellt. Eine Folie, welche mit Elektroden beschichtet ist, wird mit einem polaren Substrat in Kontakt gebracht. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung wird ein elektrisches Feld erzeugt, welches eine anziehende Kraftwirkung zwischen Folie und Substrat verstärkt erzeugt. Dabei ist die bei der elektrostatischen Adhäsion erzeugte flächige Kraftwirkung zwischen Greifer und Substrat abhängig von dem Substratmaterial – Holz, Papier, Metalle u. ä. sind möglich. Eines der beiden Systeme besitzt zur Fortbewegung Ketten, die Haftung wird zwischen Rumpf und Substrat erzeugt. Das zweite System ist eine inchwurm-ähnliche Entwicklung. Ein Rumpf verbindet zwei elektrostatische Greifer. Die Kletterfähigkeit wurde an senkrechtem Substrat nachgewiesen.

2.4.3 Kletterroboter mit magnetischer Wirkpaarung

Der einzige Kletterroboter mit elektrischer und somit aktiver Erzeugung des Magnetfeldes ist der Roboter SCID [Longo et al. 2001]. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal ist der zeitdiskrete Kontakt zum Substrat. Die weiteren Systeme erzeugen das Magnetfeld mit Permanentmagneten und besitzen einen permanenten Kontakt zum Substrat.

Diese Permanentmagnete können in unterschiedlicher Anzahl in Rädern ([Innovation First 2009a], [Tache et al. 2007], [Rochat et al. 2009], [Yanqiong et al. 2008]) oder in kettenähnlichen Bändern ([Innovation First 2009b]) angeordnet sein. Dabei dominieren Lokomotionsformen mit kontinuierlichem Kontakt und vollrotatorischer Bewegung (RCL und RCB) der Effektoren (vgl. Abb. 11). Es handelt sich um Roboter mit einer Masse zwischen 0,15 kg und 3,5 kg.

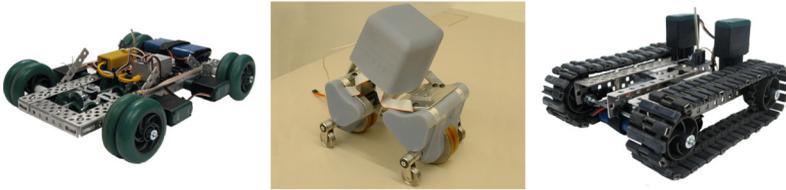


Abb. 11 – Kletterroboter mit magnetischen Greifern. Bei den Robotern mit magnetischer Wirkpaarung dominieren rad- und kettenartige Greifer, bei denen eine bestimmte Anzahl von Permanentmagneten integriert ist. links: Magbot 1, Mitte: Magnebike, rechts: Magnetbot 2 (Bildquellen: [Innovation First 2009a], [Tache et al. 2007], [Innovation First 2009b]).

2.4.4 Kletterroboter mit strömungsbasierten Greifern

Die Vertreter der strömungsbasierten Greifer ähneln sich in ihrem Aufbau. Ihre Gestalt ist dominiert durch eine Vakuumpumpe, welche wie bei dem Roboter CIYTClimber [Xiao et al. 2007] als Vortex-Pumpe ausgeführt sein kann. Diese generiert in einem Bereich zwischen Roboter und Substrat einen dynamisch erzeugten Unterdruck. Dies hat eine anziehende Kraftwirkung zur Folge.



Abb. 12 – Roboter mit strömungsbasierten Greifern. Der Aufbau der Systeme ist ähnlich und wird durch die Vakuumpumpe determiniert. links: ALICIA 1, Mitte: CROMSCI, rechts: bei ALICIA 3 sind drei Greifer gekoppelt. (Bildquellen: [Longo et al. 2006], [Hillenbrand et al. 2008]).

Die lateralen Kräfte werden meist über radbasierte Lokomotionssysteme aufgenommen. Anwendung finden ausschließlich Fortbewegungsarten mit

rotatorischer Effektorbewegung. Weitere Systeme sind die Roboter der ALICI-A-Serie [Longo et al. 2006] und der Roboter CROMSCI der TU Kaiserslautern [Hillenbrand et al. 2008].

2.4.5 Kletterroboter mit fluidisch-statischen Unterdruckgreifern

Kletterroboter mit fluidisch-statischen Greifern bilden die größte Gruppe. Die Greifer werden häufig als Vakuumbreifer, als Unterdruckgreifer oder als Saugnapfe bezeichnet. Es ist die vielgestaltigste Gruppe, in der sowohl aktive als auch passive Greifer vorkommen (siehe Abb. 13).

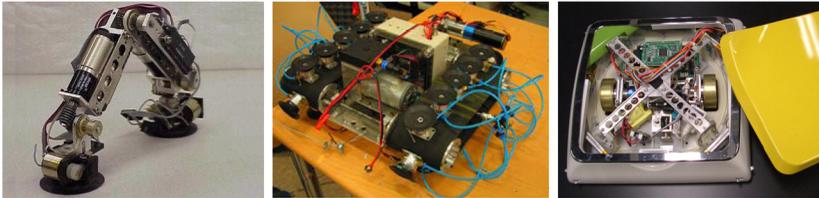


Abb. 13 – Kletterroboter mit fluidisch statischen Greifern. In dieser Klasse der Roboter ist eine Vielzahl verschiedener Kombinationen aus Greifern und Lokomotionsformen zu finden. Links: Flipper mit passiven Greifern, Mitte: Tracked Climbing Robot mit aktiven Greifern und Kettenantrieb, rechts: WallWalker mit gleitendem Saugnapf und Radantrieb. (Bildquellen: [Minor et al. 2003], [Miyake et al. 2007]).

Ein aktives System ist zum Beispiel WALLWALKER [Miyake et al. 2007], ein passives System ist FLIPPER [Minor et al. 2003]. Als Lokomotionsformen kommen sowohl vollrotatorische (vgl. [Kim et al. 2008]) als auch oszillierende (vgl. [Yoneda et al. 2001]) Antriebssysteme in Anwendung. Es wird aufgrund der hohen Anzahl verschiedener Systeme auf die Liste der Kletterroboter in Tab. A im Anhang verwiesen.

2.4.6 Kletterroboter mit Wirkpaarung durch eindringende Festkörper

Greifer, welche in die duktile Oberfläche eines Substrats eindringen und so die Greifkräfte formschlüssig erzeugen, werden als Eindringungsgreifer bezeichnet. Die Entwicklung von Kletterrobotern mit dieser Art von Greifern wird vorrangig durch Forschungseinrichtungen in den USA getrieben. Die Effektoren der Greifer sind zumeist als Haken, als Dorne oder als Nadeln ausgeführt.

Eine interessante Eigenschaft des Roboters SCREENBOT ist die vollrotatorische Extremitätenbewegung [Wile et al. 2008]. Der einfache Aufbau führt zu einem System mit geringer Masse von 130 g. Weitere Roboter sind die RISE-

Roboter [Haynes et al. 2009], [Saunders et al. 2006], SPINYBOT [Asbeck et al. 2006]. In [Clark et al. 2007] wird ein System vorgestellt, welches mit nur zwei Greifern an vertikalen Flächen klettern kann. Alle anderen Roboter dieser Klasse verfügen über mehr als zwei Greifer. Ausschließlich Lokomotionsformen mit zeitdiskretem Substratkontakt finden Anwendung (vgl. Abb. 14).



Abb. 14 – Kletterroboter mit eindringenden Greiferstrukturen. Links: Screenbot, Mitte: RISE V3, rechts: Dorn als Greiferstruktur des Roboters RISE 3 (Bildquellen: [Wile et al. 2008], [Haynes et al. 2009])

2.4.7 Roboter mit mechanisch anpressenden Greifern

Roboter mit anpressenden Greifern gibt es in sehr verschiedenen Ausführungen (vgl. Abb. 15). Systeme mit so genannten Klemmgreifern sind ROMA I [Balaguer et al. 2000], SHADY3D [Yoon et al. 2007], RATNIC LIGHT [Mämpel et al. 2008], RATNIC].

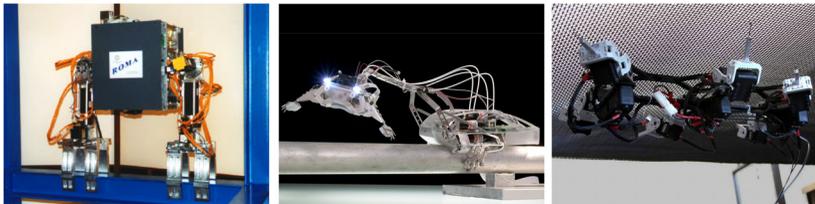


Abb. 15 – Kletterroboter mit mechanisch anpressenden Greifern. Links: Roma I mit einer Masse von 75 kg, Mitte: RatNic mit einer Masse von 1,1 kg, rechts: Beim Roboter DigBot bildet der Rumpf den Greifer (Bildquellen: [Balaguer et al. 2000], Tetra GmbH, [Palmer et al. 2009])

Umfassungsgreifer kommen bei den TREPA-Systemen [Saltarén et al. 2007] und beim POLE CLIMBER [Tavakoli et al. 2005] zum Einsatz. Eine spezielle Form des Greifens findet sich beim Roboter DIGBOT [Palmer et al. 2009]. Während bei den vorher genannten Robotern beide Greifbacken in einem Greifer integriert sind, bildet hier der Körper den Greifer.

2.5 Einschätzung des Stands der Technik in der Kletterrobotik

2.5.1 Einfluss der Wirkpaarung auf die Masse der Kletterroboter

Das Ziel eines Roboters, welcher auf variablen Substraten klettert, kann durch Integration unterschiedlicher Greifprinzipien auf einem Kletterroboter erreicht werden. Voraussetzung ist eine Masse des Roboters, bei der sich eine Vielzahl unterschiedlicher Wirkpaarungen realisieren lassen. In Abb. 16 sind die Kletterroboter sortiert nach ihrer Wirkpaarung und ihrer Masse dargestellt. Es ist zu bedenken, dass hierbei nicht die physikalischen Grenzen der Wirkpaarung dargestellt sind. Der aktuelle Stand der Kletterroboter ist dargelegt und somit liegt Betrachtung der Machbarkeit für das Gesamtsystem zu Grunde.

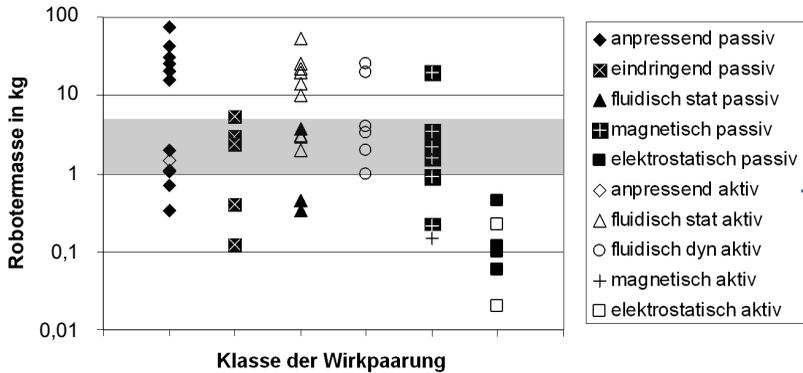


Abb. 16 – Klassifikation aktueller Kletterrobotersysteme nach der Wirkpaarung. Die Kletterroboter werden unterschieden nach der Klasse der Wirkpaarung, der Masse und der Art der Leistungsaufnahme während des Haftens. Der grau markierte Bereich deckt fünf der sechs Wirkpaarungen ab. Nicht in diesem Bereich sind Roboter mit elektrostatischen Greifern.

In Abb. 16 sind die Massen aller aus der Literatur identifizierten und in Tab. A im Anhang aufgeführten Kletterroboter nach der Wirkpaarung sortiert aufgetragen. Dabei wird deutlich, dass es keinen Massebereich gibt, in dem alle sechs Klassen der Wirkpaarung angewendet wurden. Kritisch ist einerseits die elektrostatische Wirkpaarung, welche bisher auf Kletterrobotern umgesetzt wird, welche eine Masse von maximal $0,4 \text{ kg}$ haben. Andererseits hat der leichteste Roboter mit fluidisch dynamischer Wirkpaarung eine Masse von 1 kg . Es gibt also keine Schnittmenge der Roboter eines Massebereiches, in der alle Wirkpaarungen vorkommen.

Eine Roboter­masse unter 0,1 kg ist bisher nur bei Robotern mit elektro­statische Wirkpaarung erreicht worden. Schließt man die elektro­statische Wirkpaarung aus, so scheint eine angestrebte Masse von 1 kg bis 5 kg (Bereich markiert in Abb. 16) eine hinreichende Festlegung für ein modulares Kletter­robotersystem zu sein, mit der sich verschiedene Wirkpaarungen realisieren lassen.

2.5.2 Einfluss der Lokomotionsform auf die Masse des Roboters

Zur Klassifikation der Lokomotionsprinzipien der Kletterroboter wurden die identifizierten Systeme in die Systematik nach Yim eingeordnet (vgl. Abb. 8). Betrachtet man die Verteilung der Lokomotionsprinzipien, ist festzustellen, dass bei der Mehrzahl der Roboter ein Prinzip mit schwingenden Extremitäten (SDL und SCL) verwirklicht wurde. Bei diesen dominiert das Prinzip SDL, also mit zeitdiskretem Kontakt und einer Mehrzahl von Greifern.

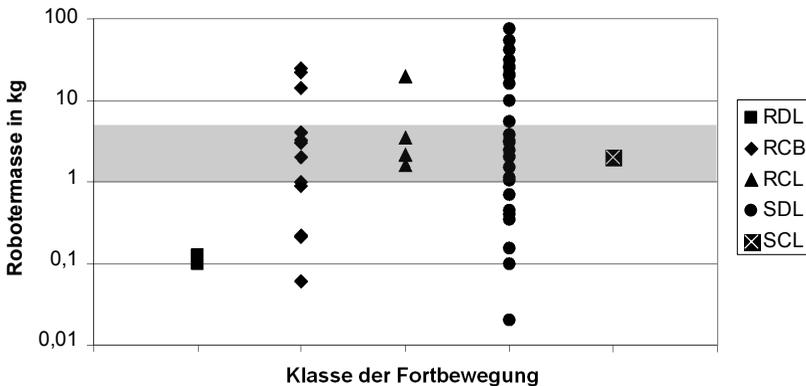


Abb. 17 – Klassifikation aktueller Kletterrobotersysteme nach der Fortbewegung. Hierfür sind die Roboter nach dem Lokomotionsprinzip gemäß [Yim 1995] und der Masse gelistet. Nicht alle in der Klassifikation vorgesehenen Klassen sind gelistet. Die meisten Roboter bewegen sich nach dem Prinzip SDL fort, d.h. mit oszillierenden Antriebsbewegungen, zeitdiskretem Kontakt und mehreren Greifern. Die graue Schraffur markiert denselben Bereich wie in Abb. 16.

Auch ist das Massespektrum der Roboter mit diesem Lokomotionsprinzip das größte. Bei den vollrotatorischen Lokomotionsprinzipien fällt auf, dass die Roboter mit zeitdiskretem Kontakt die leichtesten sind, die Masse der drei existenten Systeme liegt bei etwa 0,1 kg. Betrachtet man den über die Wirkpaarung

rungen identifizierten Bereich der Masse von 1 kg bis 5 kg, so fällt auf, dass mit Ausnahme des Prinzips RDL (rotated, discrete, little footed) alle Lokomotionsprinzipien in diesem Massenbereich realisiert sind. Es ist festzustellen, dass allein aus der Betrachtung der Robotertermasse kein Rückschluss auf ein optimales Lokomotionsprinzip zu ziehen ist. Eine Festlegung auf den Bereich zwischen 1 kg und 5 kg bietet das Potential für die Umsetzung empirisch bewährter Lokomotionsprinzipien im Robotersystem.

2.5.3 Beziehung zwischen Substrateigenschaften und Greifer

Wie aus der roboter-ökologischen Analyse (vgl. Kap. 2) ersichtlich wird, spielen für den Kletterroboter, speziell für die Greifer, die Substrateigenschaften eine wesentliche Rolle (vgl. Tab. 2). Bei den Substrateigenschaften sind Material- und Gestalteeigenschaften zu unterscheiden. Die Gestalt wird des Weiteren unterschieden in Form und Oberfläche. Für eine grobe Unterscheidung der Substrateigenschaften wird folgender, pragmatischer Ansatz gewählt. Dieser soll als Entscheidungshilfe zur Auswahl eines adäquaten Greifprinzips dienen.

Die Duktilität eines Materials beschreibt die plastische Verformbarkeit und sie spielt bei mechanischen Wirkpaarungen eine wesentliche Rolle. Für eindringende Wirkpaarungen ist ein weiches, bei anpressenden ein hartes Material von Vorteil. Unterschieden wird in

- weich und
- hart.

Der ferromagnetischen Eigenschaften des Substrats werden unterschieden in:

- weichmagnetisch und
- nicht-magnetisch.

Hartmagnetische Substrate, beispielsweise Dauermagneten, sind prinzipiell denkbar, werden aber als spezielle Infrastruktur eingestuft und damit nicht betrachtet. Bei den geometrischen Größen erfolgt die Unterscheidung bei der Oberfläche anhand der Rauigkeit, beispielsweise der Rautiefe in:

- glatt ($R_m < 0,1 \mu m$),
- rau ($0,1 \mu m \leq R_m < 100 \mu m$) und
- strukturiert ($R_m > 100 \mu m$).

Die Grobform wird anhand des Verhältnisses des Durchmessers des Substrates d_s zur Körperbreite des Roboters b_R definiert. Diese Größe wird als relativer Substratdurchmesser v_s bezeichnet.

$$v_s = \frac{d_s}{b_R} \tag{1}$$

Die Unterscheidung erfolgt darauf aufbauend in (vgl. Abb. 18):

- dünnzylindrisch ($v_s < 1$)
- dickzylindrisch ($1 \leq v_s < 10$)
- eben ($10 \leq v_s < \infty$)

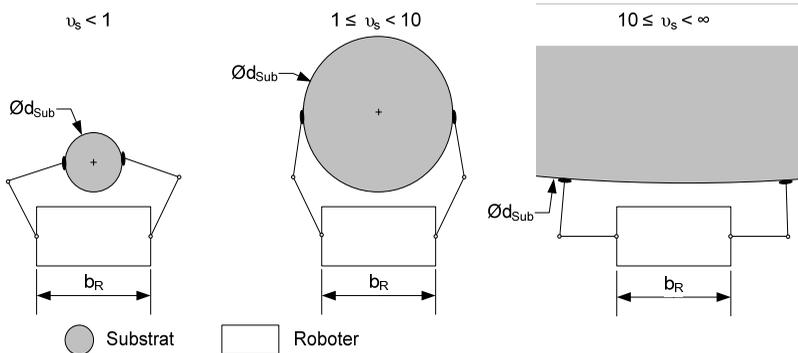


Abb. 18 – Verschiedene Klassen des relativen Substratdurchmessers v_s

Ein zylindrischer Körper wird von zwei parallelen, ebenen Flächen (Grund- und Deckfläche) und einer Mantelfläche begrenzt, die von parallelen Geraden gebildet wird. Darunter fallen alle Substrate, die man in dieser Weise abstrahieren kann, beispielsweise Seile, Rohre, Kabel und Kabelverbunde sowie, cum grano salis, Äste. Der Begriff „eben“ beschreibt ein flaches, zweidimensionales Objekt, d.h. eine Ebene wird durch zwei nicht parallele, sich schneidende Geraden definiert.

In Tab. 5 sind die Materialeigenschaften (Duktilität und Ferromagnetismus) über Gestalteigenschaften (Form und Oberflächenstruktur) abgetragen. Die Tabelle gibt einen Überblick über die Abhängigkeit zwischen der Wirkpaarung und den die Wirkpaarung bestimmten Substrateigenschaften.

Tab. 5 – Eignung der Wirkpaarungen von Kletterrobotern und Substrat. Die aufgeführten Wirkpaarungen sind: Festkörper eindringend (eind), Festkörper anpressend (anpr), elektro-statisch (elst), magnetisch (mag), fluidisch-dynamisch (fldy), fluidisch-statisch (flst). (schwarz = gut eignet, grau = bedingt geeignet)

Material Gestalt	Magnetismus	weich-magnetisch		nicht magnetisch			
	Duktilität Form	nicht duktil	duktil	nicht duktil	duktil		
glatt	eben	fldy elst	flst mag	fldy elst	flst mag	fldy elst	flst eind
	dick- zylindrisch	anpr fldy elst	flst mag	anpr fldy elst	eind flst mag	anpr fldy elst	eind flst
	dünn- zylindrisch	anpr fldy elst	mag	anpr fldy elst	eind mag	anpr fldy elst	eind
rau	eben	fldy elst	flst mag	fldy elst	flst mag	fldy elst	flst eind
	dick- zylindrisch	anpr fldy elst	flst mag	anpr fldy elst	eind flst mag	anpr fldy elst	eind flst
	dünn- zylindrisch	anpr fldy elst	mag	anpr fldy elst	eind mag	anpr fldy elst	eind
strukturiert	eben	fldy	eind mag	fldy	eind mag	fldy	eind mag
	dick- zylindrisch	anpr fldy mag	eind	anpr fldy mag	eind	anpr fldy	eind
	dünn- zylindrisch	anpr fldy mag	eind	anpr fldy mag	eind	anpr fldy	eind

Eine Präzisierung bzw. eine Quantifizierung für die genaue Dimensionierung muss im Einzelfall erfolgen. Für die Betrachtung der generellen Abhängigkeiten möge diese qualitative Betrachtung genügen. Es zeigt sich, dass allein die fluidisch dynamische Wirkpaarung geeignet oder bedingt geeignet ist, um alle Substrate zu greifen. Bei den magnetischen Wirkpaarungen determinieren die magnetischen Eigenschaften des Substrates die Eignung. Die eindringende Wirkpaarung erzielt den benötigten Formschluss auf duktilem Substrat durch Eindringen in die Oberfläche oder durch Einhaken in vorhandene Strukturen geeigneter Größe.

Ausschließend für anpressende Wirkpaarungen sind ebene Substrate. Die elektrostatische und die fluidisch-statische Wirkpaarung benötigen ein glattes oder raues, möglichst ebenes Substrat. Dabei ist auffallend, dass diese beiden Wirkpaarungen ähnliche Substrateigenschaften bedingen. Anders ausgedrückt, um auf Substraten mit diesen Eigenschaften zu klettern, müssen nicht beide Wirkpaarungen benutzt werden. Es ist hinreichend, Greifer mit einer der beiden Wirkpaarungen einzusetzen. Dies ist unter dem Aspekt interessant, dass elektrostatische Greifer bis jetzt ausschließlich auf sehr leichten Robotern zum Einsatz kommen (vgl. Abb. 16).

KAPITEL 3

Modulare mobile Robotik

Der Organismus ist nicht nach Prinzip der menschlichen Techniken, dem „Prinzip makroskopischer Ersatzteile“, konstruiert. Die Evolution projiziert nach dem „Prinzip mikroskopischer Ersatzteile. (...) Das Prinzip wäre perfekt, jedenfalls besser als das des Ingenieurs, wenn ihm die Praxis nicht so häufig widerspräche.“

Stanislaw Lem

3.1 Grundlegende Eigenschaften

Die Möglichkeit der Adaptierbarkeit des Robotersystems an seine Umwelt, speziell an das Substrat, ist ein zentraler Punkt der Fragestellung dieser Arbeit. Adaptierbare Systeme können durch modulare Systeme realisiert werden. Die Module stellen hierbei als technische Einheiten die Grundbausteine dar, aus denen sich unterschiedliche Systeme größerer Komplexität kombinieren lassen.

Insbesondere selbstkonfigurierende Systeme stehen derzeit im Blickpunkt der Forschung. Detaillierte Zusammenstellungen aktueller modularer Robotersysteme sind in [Murata et al. 2007] und [Yim et al. 2007] zu finden. Drei Eigenschaften modularer Systeme sind besonders hervorzuheben – die Vielfältigkeit in der Anwendung, die Robustheit und die Möglichkeit, kostengünstige Systeme aufzubauen:

Vielfältigkeit

Durch die vielfältigen (Re-)Kombinationsmöglichkeiten einzelner Module lassen sich Systeme erstellen. Dabei können die Einsatzgebiete sehr unterschiedlich sein.

Robustheit

Durch die Nutzung einer geringen Anzahl verschiedener Module lassen sich defekte Module leicht identifizieren und auch austauschen, ggf. können modulare Systeme autonom defekte Modu-

le erkennen und ersetzen. Redundante Strukturen erhöhen ebenfalls die Robustheit.

Kostenreduktion

Durch die Reduktion der Anzahl unterschiedlicher Teile während der Modularisierung und der anschließenden Fertigung in hoher Stückzahl lassen sich Entwicklungs- und Herstellungskosten senken.

3.2 Klassifikation

Ein wichtiger Aspekt ist die Einteilung anhand der unterschiedlichen Strukturen, welche mit den Modulen erstellt werden können. Unterschieden werden nach [Murata et al. 2007] kettenförmige, verzweigte und gitterförmige Strukturen (vgl. Abb. 19).

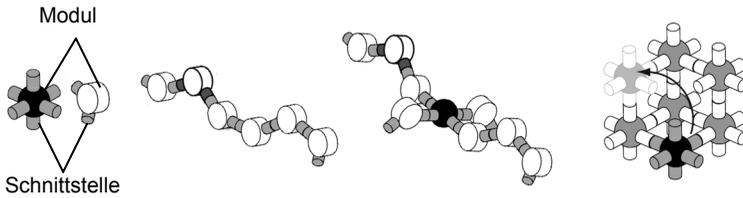


Abb. 19 – Prinzipdarstellung modularer Anordnungen. Von links nach rechts: Einzelmodule mit einer unterschiedlichen Anzahl von Schnittstellen; kettenförmige, verzweigte und gitterförmige Struktur (geändert nach [Murata et al. 2007, S. 73])

kettenförmig

Die einzelnen Module sind in einer eindimensionalen Struktur, in einer Kette, angeordnet. Jedes Modul hat maximal zwei Nachbarmodule. Aus Sicht der Mechanik handelt es sich um eine offene kinematische Kette. Derartige Strukturen werden nach [Gonzalez-Gomez et al. 2007] als „eindimensional“ bezeichnet.

verzweigt

Die Module werden in einer verzweigten Struktur angeordnet. Es bildet sich kein regelmäßiges Gitter aus, man kann diese Strukturen als eine hybride Struktur aus ketten- und gitterförmigen Strukturen interpretieren. Der Übergang ist fließend. Geschlossene kinematische Ketten sind möglich, es

dominieren offene Ketten. Diese Strukturen sind „mehrdimensional“.

gitterförmig

Die Module sind in regelmäßigen, zwei- oder dreidimensionalen Gittern angeordnet. Die können zum Beispiel kubisch oder hexagonal sein. Offene kinematische Ketten sind in der Unterzahl gegenüber geschlossenen kinematischen Ketten. Auch diese Strukturen sind „mehrdimensional“.

Der Übergang der verschiedenen Strukturen ist fließend. Ketten- und gitterförmige Strukturen stellen die Extrema der Strukturen dar. Gitterförmige Strukturen bestehen aus geschlossenen kinematischen Ketten. Dies erschwert die Bewegungserzeugung aus mechanischer Sicht durch hohen Zwang. Kettenförmige Anordnungen bilden das andere Extrem, hier dominieren die offenen kinematischen Ketten. Der geringe mechanische Zwang in offenen kinematischen Ketten sorgt für einen höheren Steuerungsaufwand.

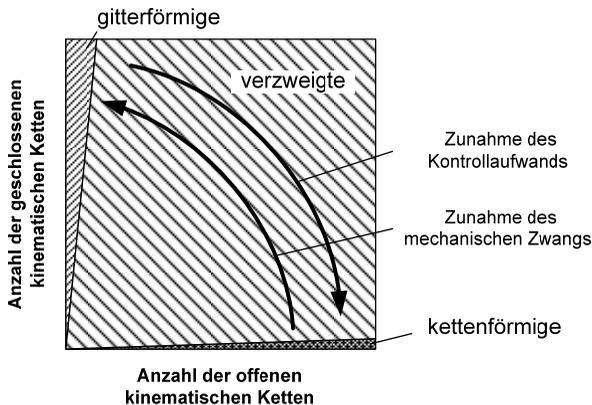


Abb. 20 – Kettenförmige, verzweigte und gitterförmige Systeme. Kettenförmige Strukturen sind bestehen aus offenen kinematischen Ketten, welche mit hohem Aufwand gesteuert werden müssen. Gitterförmige Strukturen bilden geschlossene kinematische Ketten mit geringem Kontrollaufwand. Verzweigte Systeme stellen sich als Kombination beider Extrema dar.

In [Murata et al. 2007, S. 75] werden die drei Strukturen unter unterschiedlichen Gesichtspunkten verglichen. Daraus ist die in Tab. 6 dargestellte Übersicht entnommen. Daran wird ersichtlich, dass unter dem Aspekt der einfachen Erzeugung von Bewegungen und einer möglichst geringen Anzahl

benötigter Aktoren und Schnittstellen sinnvollerweise nur verzweigte und kettenförmige Strukturen für die Umsetzung als Kletterroboter zu betrachten sind.

Tab. 6 – Eigenschaften kinematischer Strukturen modularer Robotersysteme. (erweitert nach [Murata et al. 2007])

Struktur	Bewegungs-generierung	Mechani-scher Zwang	Anzahl der Aktoren	Anzahl der Schnittstellen	Kontroll-aufwand
kettenförmig	einfach	keiner	wenige	wenige	hoch
verzweigte	einfach	mittel	wenige	wenige	mittel
gitterförmig	schwer	hoch	viele	viele	niedrig

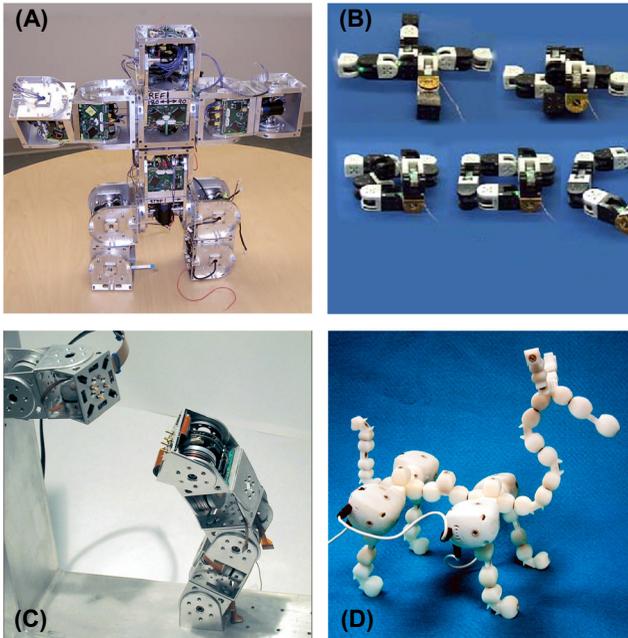


Abb. 21 – Modulare Robotersysteme. (A) Superbot als bipeder Roboter, (B) Gestaltungsvielfalt von M-Tran II, (C) Superbot als „stationärer“ Roboter, (D) Topobo als quadrupede Struktur. (Bildquellen: [Yim et al. 2007], [Murata et al. 2007], [Raffle et al. 2004]).

Die Module in solchen System können alle identisch oder aber auch unterschiedlich sein, es handelt sich dementsprechend um homogene und heterogene Systeme:

Homogene Systeme

Systeme, welche aus Modulen gleicher Gestalt und gleicher Funktion aufgebaut sind. Die Module werden als homomorph bezeichnet. Sie besitzen alle eine funktions- und gestaltidentische Schnittstelle.

Heterogene Systeme

Systeme, welche aus in Gestalt und Funktion unterschiedlichen Modulen aufgebaut sind. Die Module dieses Systems werden als heteromorphe Module bezeichnet.

Tab. 7 – Technische Parameter und Eigenschaften der Module

Name	Diversität	Freiheitsgrad f	Moment M in Nm	Anzahl der Schnittstellen	Länge l in mm x Breite b in mm x Höhe h in mm	Masse eines Moduls m_M in kg
POLYBOT (G3)	heterogen	1 ro	1,5	2	50x50x45	0,2
M-TRAN II	homogen	2 ro II	1,9	2	132x66x66	0,4
CONRO	homogen	2 ro x	0,4/0,2	2	104x30x30	0,1
SUPERBOT	homogen	2 ro x	6,4	6	168x84x84	0,5
ROOMBOTS	homogen	3 ro +	5,0	10	220x110x110	1,4
YAMOR	homogen	1 ro	0,7	2	100x50x45	0,2
MOLECUBES	heterogen	1 ro	5,0	6	66x66x66	0,2

ro - rotatorisch, II - Parallele Drehachsen, x - windschiefe Drehachsen, + - schneidende Achsen

3.3 Kettenbildende modulare Robotersysteme

Die Mehrzahl der identifizierten modularen Systeme sind homogene Systeme, wie das System CONRO [Castano et al. 2000], YAMOR [Dittrich 2004] und M-TRAN II [Kurokawa et al. 2003]. Hier dienen die einzelnen Module als Grund-

bausteine für Lokomotionssysteme für pedale oder apedale Fortbewegung (vgl. Abb. 21). Das System ROOMBOTS [Sproewitz et al. 2009] hat das Ziel der Entwicklung formadaptiver Objekte wie Möbel, dienen aber auch als Grundlage für die Entwicklung von Lokomotionssystemen.

Mit dem SUPERBOT [Salemi et al. 2006] gibt es den ersten Ansatz eines modularen Systems als Kletterroboter [Ranasinghe et al. 2007]. POLYBOT G3 [Yim et al. 2007] kann als heterogenes System betrachtet werden. Hier existiert neben den bewegungserzeugenden Modulen eine Vielzahl verschiedener Module für den Bodenkontakt. MOLECUBES [Zykov et al. 2007] ist ein System, welches zusätzlich zu Bewegungsmodulen aus einem Kommunikationsmodul und einem Speichermodul sowie über Greifer verfügt.

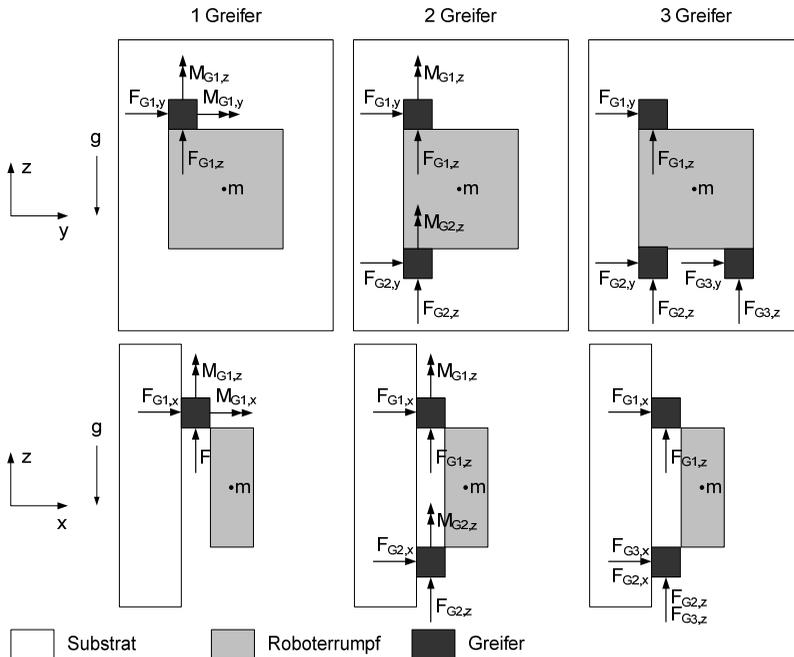


Abb. 22 – Auftretende Kräfte und Momente an den Greifern. Links: Ist nur ein Greifer im Kontakt zum Substrat, muss dieser Kräfte und Momente in x-, y- und z-Richtung aufnehmen. Mitte: Befinden sich zwei Greifer im Kontakt, treten Kräfte in allen drei Richtungen und das Moment in einer Achse auf. Rechts: Bei drei (oder mehr Greifern) treten ausschließlich Kräfte in x-, y- und z-Richtung auf.

Heterogene Systeme mit zusätzlichen extramodularen Komponenten sind LEGO MINDSTORMS® und FISCHERTECHNIK® ROBO MOBILE SET. Eine weitere Entwicklung in diesem Feld ist TOPOBO des MIT Media Lab [Raffle et al. 2004].

Die mechanischen Parameter der vorgestellten modularen Systeme sind in Tab. 7 dargestellt. Die Abmessungen und die Masse der einzelnen Module variieren stark. Die Module des CONRO-Systems sind mit 0,1 kg am leichtesten; die schwersten Module sind die ROOMBOTS-Module mit 1,4 kg. Allerdings besitzen diese mit $f = 3$ den höchsten Freiheitsgrad. Die Antriebsmomente variieren von 0,2 Nm der Module des CONRO-Systems bis zu 6,4 Nm der SUPERBOTS-Module.

3.3.1 Entwurf eines Referenzsystems

Durch eine Überprüfung der prinzipiellen Eignung der modularen Systeme für ein Kletterrobotersystem sollen technische Parameter als Anforderungen für das zu entwickelnde System abgeleitet werden. Eine Abschätzung der Eignung modularer Systeme für die Anwendung als Kletterroboter und die Dimensionierung des modularen Systems soll anhand eines einfachen Modells erfolgen.

Kletterrobotersysteme verfügen über eine variierende Anzahl von Greifern (vgl. Tab. A6). Abhängig von der Anzahl, müssen die Greifer Kräfte und Momente auf das Substrat in unterschiedlichen Achsen übertragen (vgl. Abb. 22). Ist nur ein Greifer im belastbaren Kontakt zum Substrat, muss der Greifer Kräfte und Momente in allen drei Achsen übertragen. Bei zwei Greifern reduzieren sich die zu übertragenden Momente auf eine Achse. Bei drei und mehr Greifern müssen ausschließlich Kräfte übertragen werden.

Ein Kletterroboter mit zwei Greifern stellt dabei die höchste Anforderung bezüglich der übertragenden Kräfte und Momente. Zur Positionierung der Greifer im Raum in allen translatorischen und rotatorischen Freiheiten ist ein mechanischer Freiheitsgrad von $f = 6$ notwendig. Dies soll in der Modellrechnung abgebildet werden. Das in Abb. 23 dargestellte Modell bildet einen Kletterroboter mit zwei Greifern ab, die durch eine serielle Anordnung von sechs Modulen mit dem mechanischen Freiheitsgrad von $f = 1$ gekoppelt sind.

Mechanisch betrachtet stellt dieses gestreckte System eine pessimale Abschätzung, den so genannten „worst case“, dar; die Belastung des Systems ist maximal (bezogen auf die mechanische Belastung im Vergleich zu anderen aufgebauten Systemen, welche aus der gleichen Anzahl von Modulen beste-

hen). Diese maximale Belastung bezieht sich sowohl auf die Greifmodule als auch auf die Bewegungsmodule.

Die Bewegungserzeugung erfolgt durch sechs Module mit dem Freiheitsgrad $f_M = 1$ und einer Länge $l_{M/f=1}$. Je nach Ausführungsform der dargestellten Systeme mit höherem Modulfreiheitsgrad bedeutet dies eine Anzahl von zwei, drei oder sechs Modulen. Hinzu kommen noch zwei Greifer, welche jeweils in einem weiteren Modul gleicher Masse m_M wie bei den Bewegungsmodulen realisiert werden. Der Roboter soll in dieser Ausrichtung gehalten werden, das heißt, die Antriebe im substratnahen Modul müssen das größte notwendige Moment erzeugen.

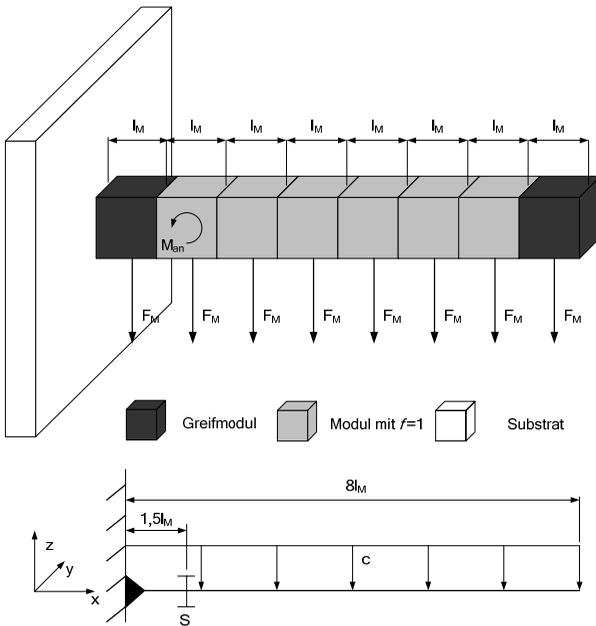


Abb. 23 – Abstraktion einer Kletterroboterstruktur. Diese besteht aus sechs Modulen mit dem Gesamtfreiheitsgrad $f = 6$ und zwei Greifermodulen. Oben: Körpermodell, unten: Abstraktion als Biegebalken mit einer Linienlast c und eingezeichnetem Schnittufer S

Abstrahiert dargestellt wird das Modell als ein Biegebalken mit einseitiger fester Einspannung betrachtet. Dieser Biegebalken hat die Länge von acht Modulen, welche sich aus der Länge von zwei Greif- und sechs Bewegungsmodulen zusammensetzt. Das Moment im Bewegungsmodul, das sich am

nächsten zum Substrat befindet, ist das maximal erforderliche und berechnet sich wie folgt:

$$M_{An,erf} = \frac{1}{2} c (6,5 l_{Mf=1})^2 \quad (2)$$

mit c als Linienlast, welche sich aus der Masse der acht Module berechnet,

$$c = \frac{g \cdot 8 m_{Mf=1}}{8 l_{Mf=1}} \quad (3)$$

ergibt sich durch Einsetzen der Formel (3) in Formel (2) das Moment zu

$$M_{An,erf} = \frac{1}{2} l_{Mf=1} g m_{Mf=1} (6,5)^2 . \quad (4)$$

Da die Module teilweise eine Freiheitsgrad von $f > 1$ haben, wird dies über eine Normierung der Modullänge berücksichtigt. Die normierte Modullänge $l_{Mf=f}$ berechnet sich aus der Modullänge l_M und dem Freiheitsgrad f_M :

$$l_{Mf=1} = \frac{l_M}{f_M} . \quad (5)$$

Eine normierte Masse $l_{Mf=f}$ berechnet sich analog zu

$$m_{Mf=1} = \frac{m_M}{f_M} . \quad (6)$$

Berücksichtigt man diese Normierung bei der Momentberechnung, ergibt sich das maximale Moment zu

$$M_{erf} = \frac{1}{2} \frac{l_M g m_M}{f_M^2} (6,5)^2 . \quad (7)$$

3.3.2 Bewertung des aktuellen Stands in der modularen Robotik

Die für die Eignung als Kletterrobotersystem relevanten technischen Parameter sind in Tab. 8 dargestellt. Der Erfüllungsgrad S drückt aus, wie das Verhältnis zwischen vorhandenem Antriebsmoment M_M gegenüber dem erforderlichen Moment M_{erf} der Module ist. Wie ersichtlich ist, erfüllen SUPERBOT und MOLECUBES die Anforderungen zu mehr als 100 %. An diesen beiden Systemen wird die Machbarkeit des modularen Kletterrobotersystems deutlich. Pro Freiheitsgrad beträgt die Modullänge

zwischen 60 mm und 84 mm. Die Masse pro Freiheitsgrad beträgt zwischen 0,20 kg und 0,25 kg. Die restlichen Systeme erfüllen die Forderung zu ca. 70 % mit Ausnahme der YAMOR-Module, welche lediglich einen Erfüllungsgrad von 16 % aufweisen.

Tab. 8 – Eignung der modularen Systeme als Kletterroboter

Name	Freiheitsgrad	Länge l_M in mm	Modulmasse m_M in kg	Modulmoment M_{Min} Nm	erforderl. Moment M_{er} in Nm	Erfüllungsgrad S
POLYBOT (G3)	1 ro	50	0,2	1,5	2,1	72%
M-TRAN II	2 ro II	132	0,4	1,9	2,8	70%
CONRO	2 ro +	104	0,1	0,4	0,6	72%
SUPERBOT	2 ro +	168	0,5	6,4	4,4	148%
ROOMBOTS	3 rot +	220	1,4	5,0	7,1	70%
YAMOR	1 ro	100	0,2	0,7	4,2	16%
MOLECUBES	1 ro	60	0,2	5,0	2,8	182%

ro: rotatorisch, II: Parallele Drehachsen, x: windschiefe Drehachsen, +: schneidende Achsen

Als Zielgröße für die Masse eines Moduls mit dem Freiheitsgrad $f = 1$ ist mit 0,25 kg orientiert am System POLYBOT realistisch: Dies würde bei einem System bestehend aus acht Modulen eine Masse von 2,0 kg bedeuten und würde somit der aus dem aktuellen Stand der Kletterrobotik hergeleiteten Anforderung von 1 kg bis 5 kg entsprechen. Als Wert der Modullänge sollten 60 mm realistisch sein. Bei dem System POLYBOT wird eine Länge von 50 mm erreicht. Unter dem Gesichtspunkt der deutlichen Reduktion des erforderlichen Antriebsmoments bei kleiner Modullänge, werden 50 mm als Wunschforderung festgelegt.

KAPITEL 4

Modularisierung in der Mechatronik

„Die Evolution sammelt nicht ihre eigenen Erfahrungen. Sie ist ein Konstrukteur, der seine früheren Errungenschaften vergisst.“

Stanislaw Lem

4.1 Grundlagen der Modularisierung

4.1.1 Modularisierung technischer Systeme

In der Richtlinie VDI 2206 wird die Modularisierung als eine Zerlegung komplexer mechatronischer Systeme in Teilsysteme beschrieben. Diese Teilsysteme mechatronischer Systeme sind wiederum als mechatronische Systeme zu betrachten, welche im Rahmen dieser Arbeit als Module bezeichnet werden. Vice versa werden aus Modulen komplexere mechatronische Systeme aufgebaut (vgl. [NORM VDI 2206, 1990, S. 17]).

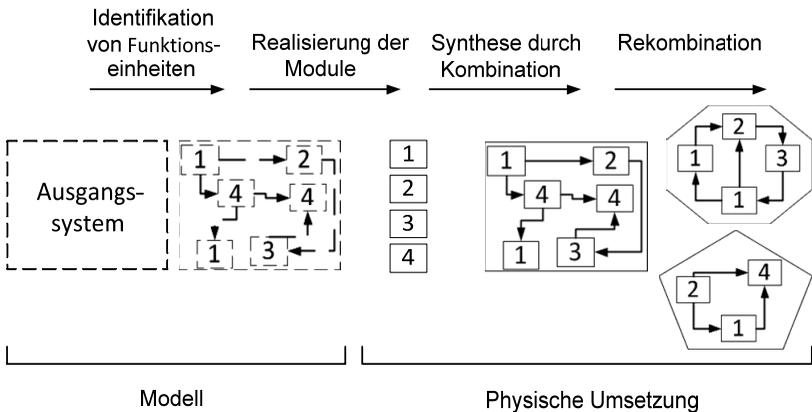


Abb. 24 – Prozess der Modularisierung eines Systems. Ein Ausgangssystem (1) wird in mechatronische Teilsysteme (Module) zerlegt. Diese Module werden entwickelt und gefertigt. Aus diesen Modulen lässt sich das Ursprungssystem wieder aufbauen. Darüber hinaus lassen sich durch Rekombination der Module neue Systeme aufbauen.

Dabei kann das neue System gleiche oder andere Eigenschaften und Funktionen haben, als das der Modularisierung zugrunde gelegte System. Bei dem aus Modulen aufgebauten System wird von einem System höherer Ordnung gesprochen. Dabei bestimmt die Funktion der Module in ihrer Gesamtheit letztlich die Funktion des Gesamtsystems (vgl. Abb. 24).

Als ein Grund für die Verwendung eines modularen Konzepts ist die Reduktion der Komplexität des zu entwickelnden Systems zu sehen. Ist das System entsprechend modularisiert, lassen sich des Weiteren einerseits Entwicklungsaufgaben teilen und andererseits eventuell bestehende Teilsysteme mit geringem Aufwand einbinden. Die Modularisierung stellt sich somit als eine Abgrenzung von Teilsystemen innerhalb eines Gesamtsystems dar.

4.1.2 Kriterien für Modularisierung

Die [NORM VDI 2206, 2006] schlägt „... die Bildung einer Produktstruktur mit Modulen, bei der die Beziehungen zwischen den Modulen geringer ausgeprägt sind, als die Beziehungen innerhalb der Module“ vor. In der Informationstechnik existieren für die Softwareentwicklung Gestaltungsregeln für die Entwicklung modularer Architekturen. Als wichtige Kriterien des modularen Entwurfs werden aufgezeigt:

- Zerlegbarkeit** Das Gesamtsystem lässt sich in Teilsysteme zerlegen, welche unabhängig voneinander dem Entwurfsprozess zugeführt werden können.
- Kombinierbarkeit** Module sind unabhängig voneinander verwendbar. Durch Rekombination lassen sie sich zu Systemen in unterschiedlichen Anwendungsbereichen zusammenfügen.
- Verständlichkeit** Module sind unabhängig voneinander zu verstehen, d.h. die Funktion des einzelnen Moduls muss eindeutig definiert sein.
- Kontinuität** Eine Änderung der Entwurfsanforderungen sollte nur Änderungen innerhalb eines oder weniger Module erfordern.

Da diese Kriterien allgemeiner Natur sind, sollten sie auch beim Entwurf modularer mechatronischer System Beachtung finden.

In [Parnas et al. 1985] wird das Modul als Entwurfseinheit angesprochen, hier ebenfalls spezialisiert auf den Bereich der Softwareentwicklung. Das Modul

definiert sich dabei einzig über seine Schnittstellen nach außen. Die innere Struktur soll verborgen bleiben. Dieses Prinzip wird als „information hiding“ oder als „Geheimnisprinzip“ bezeichnet. Es besagt, dass Daten nur über die exportierten Operationen bearbeitet werden können, die Realisierung der Datenstruktur bleibt verborgen. Überträgt man dieses Prinzip von der Softwareentwicklung auf mechatronische Systeme, ist dies wie folgt zu interpretieren:

1. Wechselwirkungen - und somit Energie-, Informations- und Stoffübertragung - zwischen den Modulen können ausschließlich über die definierte Schnittstellen erfolgen.
2. Die interne mechatronische Struktur der Module, bestehend aus Mechanik-, Elektronik- und Softwarekomponenten, bleibt dem Nutzer verborgen.

Bei der Modularisierung von Software werden zwei Kriterien für die Qualität der Zerlegung herangezogen: Kohäsion und Kopplung. Die Kopplung beschreibt die Quantität der Wechselwirkungen zwischen den Modulen. Sie ist damit auch eine Beschreibung der Abhängigkeit der Module voneinander. Unter dem Gesichtspunkt der Unabhängigkeit der Module ist eine minimale Kopplung anzustreben. Die Kohäsion beschreibt die Bindung und Wechselwirkungen innerhalb eines Moduls, d.h. den internen Zusammenhalt. Die Kohäsion ist zu maximieren.

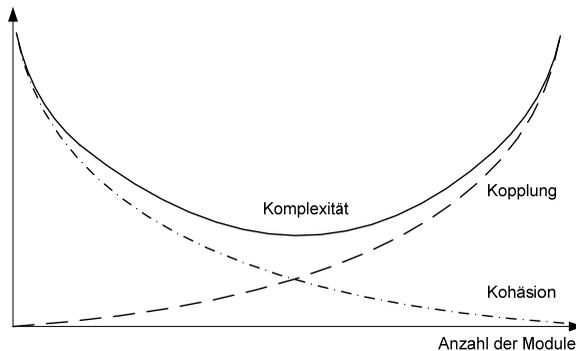


Abb. 25 – Komplexität des Gesamtsystems. Mit steigender Anzahl der Module, in die ein System zerlegt wird, steigt die Kopplung der Module und sinkt die Kohäsion innerhalb eines Moduls.

Die Ziele minimaler Kopplung und maximaler Kohäsion sind nicht als unabhängig voneinander einzuschätzen. Eine Aufteilung eines Systems in wenige, im Extremfall in einem Modultyp, erfüllt die Ziele minimaler Kopplung und hoher Kohäsion. Durch Erhöhung der Anzahl der Module lässt sich im Allgemeinen die Komplexität des Gesamtsystems bis zu einem Minimum reduzieren. Bei diesem Minimum ist ein ausgewogenes Verhältnis der Kopplung und der Kohäsion gefunden. Bei weiterer Erhöhung der Anzahl der Module erhöhen sich zwangsläufig die Kopplungen zwischen den einzelnen Modulen, die Kohäsion sinkt. Die Komplexität des Gesamtsystems nimmt dabei wieder zu. (nach [Myers 1978])

Ein weiteres Kriterium stellt die Identifikation von Baugruppen gleicher Funktion dar. Das Ziel der Modularisierung ist die Identifikation von Modulen mit gleichen Eigenschaften. Insbesondere beim Fertigungsprozess der Module hat dies Vorteile. So können höhere Stückzahlen einzelner Module erreicht werden. Dies äußert sich einerseits in der Senkung der Komplexität des Gesamtsystems und andererseits in der Reduktion der Herstellungskosten.

4.2 Diversität modularer Systeme

4.2.1 Homogenität vs. Heterogenität

In der modularen Robotik existieren unterschiedliche Ansätze der Modularisierung. Das Extrem der Konzepte ist das Erzeugen komplexer Systeme aus einheitlichen Modulen – so genannte homogene Systeme. Heterogene Systeme können so unterschieden werden, dass sie entweder ausschließlich aus einerseits elektronisch aktiven oder andererseits sowohl aus elektronisch aktiven als auch elektrisch passiven Elementen bestehen.

Die Module homogener Systeme sind homomorph in Bezug auf ihre Größe und ihre Funktion. Diese Module erfüllen dabei genaue eine definierte Grundfunktion im Gesamtsystem. Man könnte dies auch als ein funktionelles Normal interpretieren. Aus diesen Modulen aufgebaute Systeme können nur Funktionen erfüllen, welche sich aus der Grundfunktion generieren lassen. Entscheidende Möglichkeiten für die Realisierung höherer Funktionen sind beispielsweise Kaskadierung und Hierarchisierung von Modulverbänden.

Die Module heteronomer Systeme können demnach in ihrer Größe sowie in ihrer Funktion differenziert sein (vgl. Abb. 26). Sie sind so gestaltet, dass sie jeweils eine bestimmte, von anderen Modulen abweichende Funktion erfüllen

können. Es findet demnach eine Funktionsdifferenzierung statt, diese Module erfüllen jeweils unterschiedliche Grundfunktionen in dem modularen System.

Als heterogen ist ein System mit Modulen zu bezeichnen, welche zwar dieselbe Funktion erfüllen, aber eine unterschiedliche Größe besitzen. Dabei ist ein lineares Skalieren der Modulparameter nicht zielführend, es sind allometrische Effekte bei der Veränderung von Modulabmessungen zu berücksichtigen. Es ist davon auszugehen, dass die Module für heteronome System und homogene Systeme fertigungsbedingt etwa die gleiche minimale Größe besitzen können (vgl. Tab. 8). Dies bedeutet, dass komplexe Systeme aus homomorphen Modulen in der Regel größer sind. Dieser Größenunterschied wird umso stärker, je differenzierter die Funktionen eines heterogenen Systems gegenüber der Funktion eines Moduls des homogenen Systems sind.

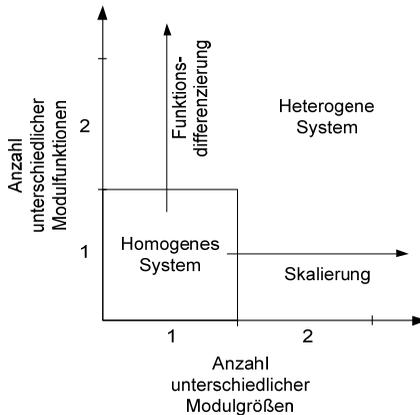


Abb. 26 – Homogene und heterogene Systeme

Dem Vorteil der Funktionsdifferenzierung in den Modulen steht der Nachteil des erhöhten konstruktiven Aufwands gegenüber. Ein homogenes System besitzt den aufgrund der Gleichheit aller Module den geringsten Aufwand bei Konstruktion und Fertigung. Dies betrifft sowohl die Konstruktion der Module selbst, als auch die Realisierung der notwendigen Kopplungen zwischen den Modulen. Eine einheitliche Schnittstelle für Module gleicher Größe ist einfacher zu realisieren als die Schnittstelle für Module unterschiedlicher Größe. Eine der zentralen Aufgaben bei der Entwicklung modularer Systeme ist die Definition einer oder mehrerer standardisierter Schnittstellen im System.

4.2.2 Aufbau eines modularen heterogenen Systems

Für das modulare System „Kletterroboter“ müssen verschiedenartige Funktionen umgesetzt werden. Aus diesem Gesichtspunkt wird ein heterogenes modulares System angestrebt. In diesem wird in jeweils einem Modultyp eine Grundfunktion des Kletterroboters realisiert. Ein solches System wird in [Bögelsack et al. 1985, S. 325 ff.] skizziert. Darin angelehnt werden die Module eines solches Systems wie folgt anhand ihrer Funktion definiert. Als Grundfunktionen werden hier grundlegende, sich wiederholende bzw. allgemeine Funktionen verstanden.

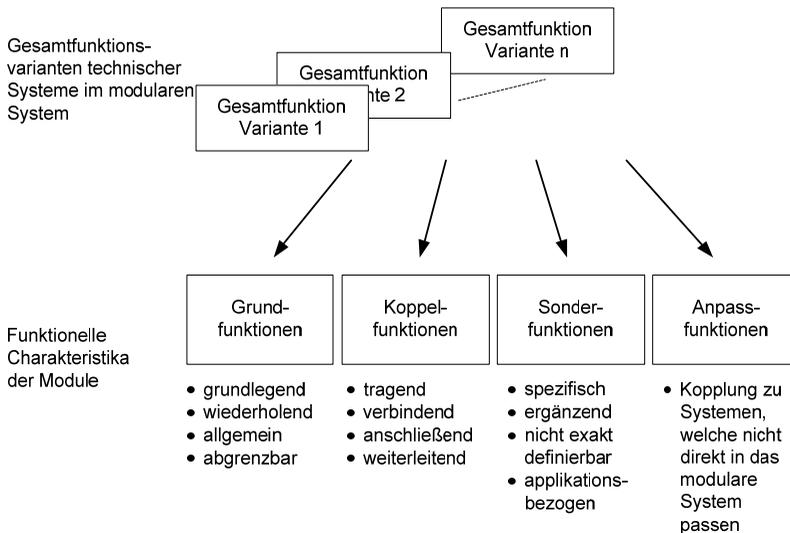


Abb. 27 – Baukastensystem für Roboter [Bögelsack et al. 1985, S. 325]

Für das Kletterrobotersystem sind solche Grundfunktionen das Greifen und die Bewegungserzeugung. Die Energieversorgung und die Kommunikation ebenfalls als Grundfunktion angesehen werden. Weitere Funktionen sind Koppelfunktionen. Dazu zählen mechanische sowie elektrische Kopplungen. Sonderfunktionen und Anpassfunktionen werden bei der Basisauslegung eines solchen Systems nicht betrachtet. Über die optimale Struktur modularer Systeme wird hier keine Aussage getroffen.

4.3 Abgeleitete Prinzipien des modularen Entwurfs

4.3.1 Kriterien

Der modulare Entwurf eines Systems basiert immer auf einem Ausgangssystem, das modularisiert und damit in Teilsysteme aufgeteilt wird. Dabei lassen sich zusammenfassend folgende Prinzipien zusammenfassen:

1. Kopplung und Kohäsion sind unter Berücksichtigung der Komplexität des modularen Systems auszuwählen.
2. Das „Geheimnisprinzip“ ist anzuwenden, d. h. die Module sind ausschließlich über die definierten Schnittstellen bekannt und koppelbar.
3. Die Anzahl der Ausführungsformen der Schnittstellen ist zu minimieren, die Anzahl der Schnittstellen ist zu minimieren.
4. Jedes Modul soll mit möglichst wenigen anderen interagieren, dabei so wenig Informationen, Energie und Stoff wie möglich und nur so viel wie nötig austauschen.
5. Teilsysteme mit gleicher Funktion sind als identische Module ausführen (→ Extremfall: homogen modulare Systeme (siehe Kap. 3.2))

4.3.2 Modularer Entwurf im der Rahmen der Richtlinie VDI 2206

Die Richtlinie VDI 2206 gibt keinen Leitfaden für eine Vorgehensweise zur Entwicklung modularer Systeme. Da es sich aber um eine Entwicklung eines mechatronischen Systems handelt, soll das in der Richtlinie beschriebene Vorgehen die Grundlage bilden. Das V-Modell beschreibt dabei das prinzipielle Vorgehen, welches in die Phasen der Anforderungsdefinition, des Systementwurfs, des domänenspezifischen Entwurfs, der Systemintegration und der Produktfertigung unterteilt ist. Prozess begleitend sind Modellbildung und –analyse sowie die Eigenschaftsabsicherung als Möglichkeiten der Systemvalidierung dargestellt (siehe Abb. 28).

Das V-Modell wurde als Produktentwicklungszyklus etabliert. Dennoch können auch Forschungsvorhaben darin abgebildet werden. In Kap. 4.1.1 ist das in der Informationstechnik vorgeschlagene Vorgehen beim Modularisieren dargestellt. Dieses Vorgehen kann als mehrmaliges Durchlaufen des V-Modells angesehen werden (vgl. Abb. 29).

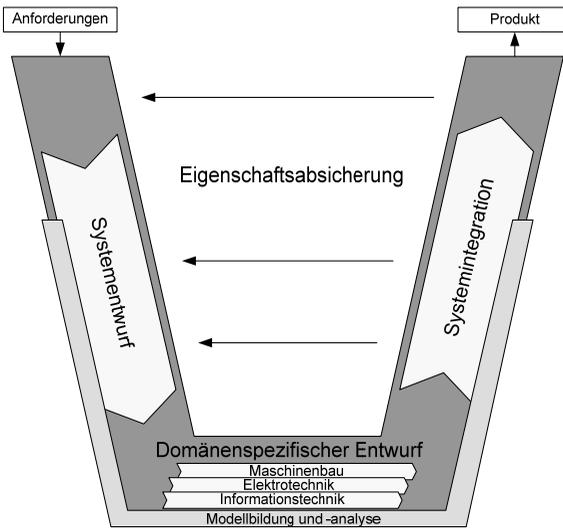


Abb. 28 – V-Modell als Zyklus im mechatronischen Entwurfsprozess. Dieser setzt sich aus den Phasen der Anforderungsdefinition, des Systementwurfs, des domänenspezifischen Entwurfs, der Systemintegration und der Produktfertigung zusammen. Eigenschaftensicherung und Modellbildung und –analyse stellen Begleitmaßnahmen dar (nach [Norm VDI 2206, 2006]).

Analysiert man den in Abb. 24 dargestellten Ablauf bei der Modularisierung, kann dieser Ablauf in einen Top-Down-Prozess und einen Bottom-Up-Prozess zerlegt werden. Der Top-Down-Prozess besteht aus der Zerlegung des Gesamtsystems in Teilsysteme und die Definition von Modulen. Im anschließenden Bottom-Up-Prozess werden aus diesen Modulen ein oder mehrere neue Gesamtsysteme aufgebaut.

Im Folgenden ist das Vorgehen beim Top-Down-Prozess dargestellt. Auf den Bottom-Up-Prozess wird im Kap. 8 eingegangen. Notwendige Voraussetzung ist ein System, welches die Möglichkeit der Modularisierung bietet. Dieses System sollte im Rahmen dieser Arbeit die grundlegenden Eigenschaften der Kletterrobotik und der modularen Robotik darstellen; eine Darstellung des Stands der Technik in beiden Bereichen der Robotik ist hierfür notwendig. Das System muss nicht physisch vorhanden sein, ein virtueller Prototyp in Form einer Funktionsstruktur wird vorgeschlagen. Die notwendigen Eigenschaften eines Kletterroboters müssen in den drei Domänen abgebildet sein.

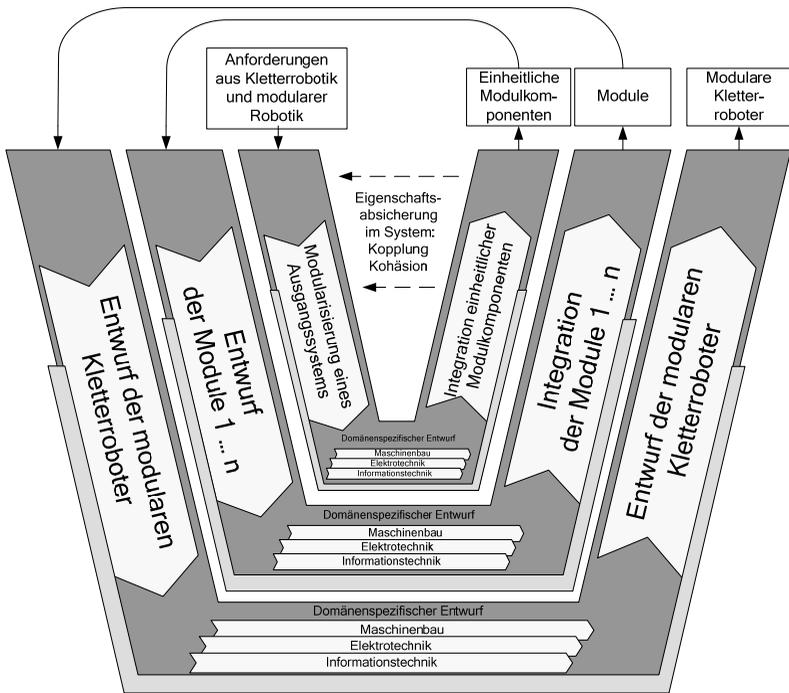


Abb. 29 – Entwicklung des modularen mechatronischen Systems. Diese wird als mehrmaliges Durchlaufen des V-Modells abstrahiert. Im 1. Makrozyklus werden die einheitlichen Modulkomponenten entwickelt. Daran schließt sich im 2. Makrozyklus die Entwicklung der unterschiedlichen Module an. Der 3. Zyklus besteht aus der Entwicklung eines Kletterroboters durch Kombination mehrerer Module.

Makrozyklus 1 Dieser erste Zyklus stellt sich als Top-Down-Prozess dar. Er schließt die Zerlegung des Systems in geeignete Teilsysteme ein, die der Forderung der niedrigen Kopplung und der hohen Kohäsion genügen. Die Schnittstelle ist dadurch in ihren Eigenschaften als eigenständiges System definiert und in den Domänen zu entwerfen. Durch Integration der domänenspezifischen Komponenten entsteht eine komplexe Schnittstelle, durch welche die Module zu verkoppeln sind. Da diese Schnittstelle einheitlich für alle Module ist, liegt es nahe, diese in einheitliche, für alle Module verwendbare

Baugruppen zu integrieren. Am Ende des ersten Makrozyklus stehen somit einheitliche Komponenten mit integrierter Schnittstelle der Module.

Ist die Schnittstelle in ihren Eigenschaften definiert, sind damit auch die Eigenschaften der potentiellen Applikationen festgelegt. Mechanisch betrachtet, muss die Schnittstelle so dimensioniert sein, dass eine bestimmte Kraft und ein bestimmtes Moment übertragen werden können. Erfordert eine Applikation ein höheres Moment, so kann dies mit dem modularen System nicht erfüllt werden. Analog verhält es sich bei den elektrischen und den informationellen Größen. Hier können beispielhaft der Strom, die Spannung und die Datenmenge angeführt werden. Überschreitet eine Applikation die maximalen Parameter der Schnittstelle, so kann die Applikation nicht erstellt werden. Die Eigenschaften der Schnittstelle sind somit sorgfältig festzulegen, definieren sie letztlich die Eigenschaften und die Grenzen des Gesamtsystems.

Makrozyklus 2 Mit den zuvor entwickelten einheitlichen Modulkomponenten werden im zweiten Makrozyklus unterschiedliche Module entwickelt. Dabei bilden sowohl die Anforderungen aus der Kletterrobotik und der modularen Robotik als auch die bereits festgelegten, einheitlichen Modulkomponenten den Rahmen der Entwicklung. Jedes Modul stellt erfordert einen eigenständigen Durchlauf des V-Modells dar; der Einfachheit geschuldet, wird in Abb. 29 nur ein Makrozyklus dargestellt. Die Module des heterogenen modularen Systems stellen das Resultat des 2. Makrozyklus' dar.

Makrozyklus 3 Ausgangspunkt des 3. Makrozyklus' sind fertige Module mit definierten Eigenschaften. Aus diesen lassen sich durch Rekombination unterschiedliche Kletterrobotersysteme aufbauen. Dies stellt sich als Bottom-Up-Prozess dar. Der Kletterroboter muss zunächst als Gesamtsystem entworfen und danach in seinen Domänen entwickelt werden. Dabei werden die Module als unveränderliche Bausteine betrachtet, welche zu einem Gesamtsystem integriert werden. Resultat des 3. Makrozyklus' stellt mindestens ein Kletterrobotersystem dar.

KAPITEL 5

Entwurf des modularen Systems

„Die Einzelheiten bestimmter – sowohl bestehender wie auch möglicher – Technologien interessieren mich nicht, und ich müsste mich nicht mit ihnen befassen, wenn die schöpferische Tätigkeit des Menschen (...) frei wäre von jeglichen Verunreinigungen durch das Ungewollte“

Stanislaw Lem

5.1 Anforderungsdefinition für einen modularen Kletterroboter

5.1.1 Ziele der Entwicklung des modularen Systems

Unter dem Gesichtspunkt der Modularisierung müssen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Welche Funktionen muss das technische System „Kletterroboter“ erfüllen?
- Kann man Teilfunktionen in der Weise zusammenfassen, dass zwischen den so entstehenden Modulen eine geringe Kopplung entsteht und innerhalb der Module eine hohe Kohäsion vorliegt.
- Wie können eine hohe Funktionsgleichheit von Modulen und somit eine kleine Anzahl unterschiedlicher Module erreicht werden?
- Welche Flüsse in Form von Energie, Stoff und Information müssen über die so entstehenden Schnittstellen übertragen werden?

5.1.2 Funktionelle Anforderungen resultierend aus dem Stand der Technik

Aus den Eigenschaften der in der Recherche identifizierten modularen Robotersysteme können folgende Rückschlüsse gezogen werden;

- Kettenförmige und verzweigte Strukturen sind adäquat zu sein für eine modulare Struktur für Kletterroboter.

- Aktuell verfügbare modulare Systeme haben teilweise die notwendigen mechanischen Parameter für den Einsatz als Kletterroboter; bei der Entwicklung kann sich daran orientiert werden.
- Die Masse, die Maße und das erzeugte Moment bzw. die erzeugte Kraft sind entscheidende Parameter für die Eignung des modularen Systems als Baukasten eines Kletterroboters.

Die Forderungen an die Funktion des Kletterroboters werden wie folgt zusammengefasst.

- der Bewegungsfreiheitsgrad ist $f = 6$ (aktuiert),
- es sind zwei Greifer vorhanden,
- der Roboter bewegt sich im Schwerfeld der Erde,
- eine temporäre energetische Autarkie muss gewährleistet sein,
- die Steuerung erfolgt durch einen Nutzer,
- höhere Steueraufgaben wie Koordination, Verhaltenssteuerung und Navigation werden zu einer „höheren“ Informationsverarbeitung zusammengefasst

5.2 Gesamtsystementwurf

5.2.1 Funktionsstruktur

Die Struktur des Kletterroboters als Gesamtsystem entspricht der Struktur des mechatronischen Systems, wie in Abb. 30 dargestellt. Das mechatronische System besteht aus einem (mechanischen) Grundsystem, welches über Sensoren und Aktoren funktionell mit einer Informationsverarbeitung verknüpft ist. Als Peripherie sind eine Energieversorgung sowie eine übergeordnete Informationsverarbeitung notwendig, eine Mensch-Maschine-Schnittstelle zu einem Nutzer optional. Die funktionale Kopplung zur Umwelt des Roboters ist essentiell. Das mechatronische System ist über einen Energie- und Stofffluss zu anderen System gekoppelt.

An den Grundaufbau eines mechatronischen Systems angelehnt, stellt sich eine Abgrenzung des Kletterroboters nach außen wie in Abb. 31 gezeigt dar. Die Funktion des Kletterroboters definiert sich über die Interaktion mit seiner Umwelt (vgl. Kap. 2). Mechanisch gesehen muss der Roboter über Greifer

definierten Kontakt zum Substrat aufbauen, halten und lösen können. Ein zur Fortbewegung mit statischem Gleichgewicht fähiges System muss über mindestens zwei Greifer verfügen. Es darf keine unlösbare Kopplung zum Substrat besitzen.

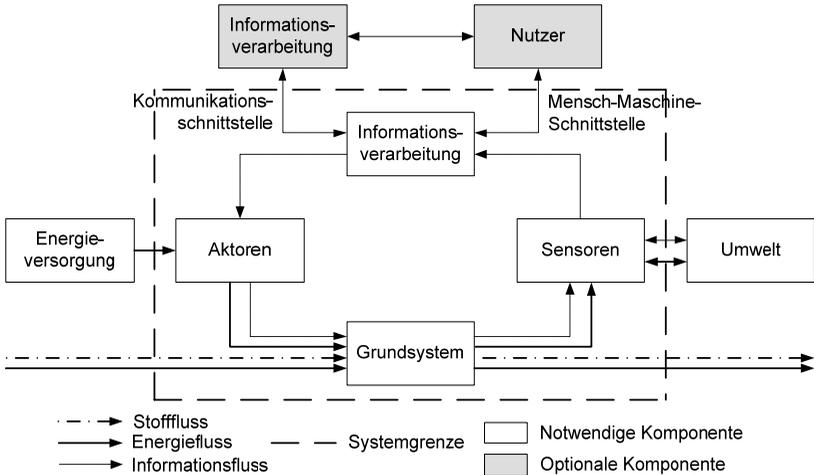


Abb. 30 – Grundstruktur eines mechatronischen Systems. Dies besteht aus einem Grundsystem, Sensoren, Aktoren und einer Informationsverarbeitung, welche einen oder mehrere Regelkreise darstellen. Das mechatronische System wird optional durch einen Nutzer und von einer übergeordneten Informationsverarbeitung gesteuert.

Der Roboter bewegt sich im Schwerfeld der Erde, auf ihn wirkt die Gewichtskraft, sowie während der Bewegung ggf. Trägheitskräfte. Bewegt sich der Roboter entgegen der Schwerkraft, speichert er potentielle Energie, welche er bei einer Bewegung in Richtung der Schwerkraft wieder abgibt. Die Kopplung zum Schwerfeld ist somit eine energetische.

Eine Autarkie sollte zumindest teilweise gegeben sein. Die Möglichkeit zur Energiezwischen-speicherung muss gegeben sein, diese Energie muss für eine bestimmte, von der Applikation abhängige Zeitspanne ausreichend sein. Dies impliziert, dass diese Energiespeicher wieder aufgeladen werden können.

Prinzipiell sind Speicher für alle Energieformen denkbar. Die Speicher werden als elektrische Speicher ausgeführt. Elektrische Energie lässt sich mit geringem

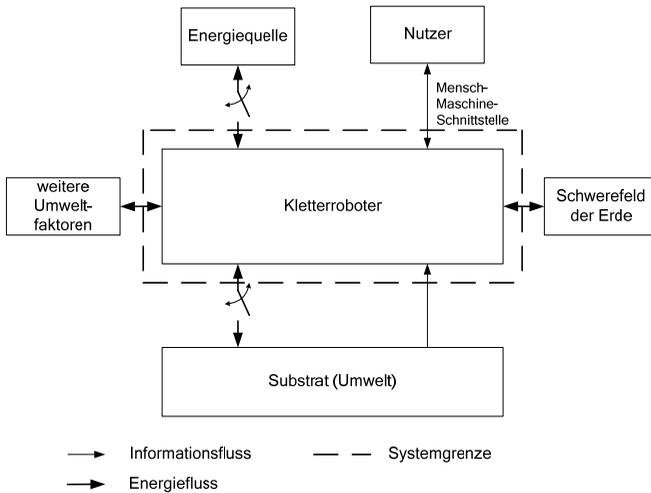


Abb. 31 – Systemgrenze des mechatronischen Systems “Kletterroboter“

Aufwand in andere Energieformen wandeln, beispielsweise in thermische und mechanische Energie. Eine trennbare Verbindung zum Energiespeicher ist notwendig. Der Roboter ist ein teilautonomes System mit einer informationstechnischen Schnittstelle zu einem übergeordneten System, ggf. für Koordination, Verhaltensberechnung oder Navigation (vgl. [Albiez 2007]). Eine Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Steuerung durch einen Nutzer ist vorzusehen.

Die Funktion eines Kletterrobotersystems entspricht grundlegend der eines Mehrachs-antriebs. Grundlage für die Modularisierung bildet die in Abb. 32 dargestellte Gesamtfunktionsstruktur. Jede Antriebsachse ist in ihrer Funktion gleich. Gesteuert wird die Energiezufuhr zu den Energiewandlern mit Hilfe von Stellgliedern. Die Wandler stellen mit Hilfe der Primärenergie die benötigte mechanische Energie bereit.

Die mechanische Energie wird mit Hilfe eines Übertragungsmechanismus auf eine mechanische Grundstruktur übertragen. Eine Funktion des mechanischen Systems ist der Greifvorgang. Durch eine mechanische Kopplung zum Substrat kann Energie gezielt mit dem Schwerfeld der Erde ausgetauscht werden. Diese mechanische Kopplung muss hergestellt, gehalten und wieder gelöst werden.

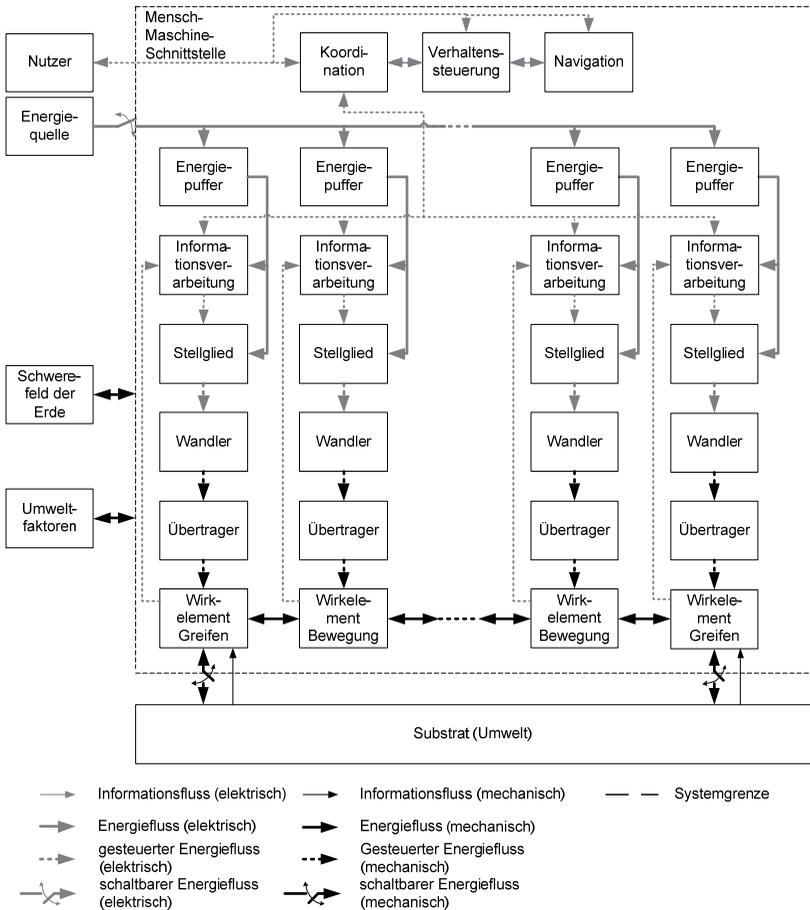


Abb. 32 – Präzisierte Funktionsstruktur eines Kletterrobotersystems

5.2.2 Vereinfachen der Funktionsstruktur

Aus der Funktionsstruktur wird abgeleitet, welche Funktionen zu einem physischen, in sich geschlossenen Modul zusammengefasst werden müssen. Der erste für die Modularisierung durchgeführte Schritt ist das Zusammenfassen der in Abb. 32 dargestellten Blöcke, die jeweils eine Funktion repräsentieren.

Zusammengefasst werden können Blöcke, zwischen denen ausschließlich eine einfache Kopplung besteht. Innerhalb dieses neu entstanden Funktionsblocks ist die Kohäsion hoch. Für das Kletterrobotersystem bedeutet dies, dass die Blöcke „Stellglied“, „Wandler“, „Übertrager“ und „Wirkelement“ zu einem Block zusammengefasst werden können. Dieser Block wird ab hier als „mechanische Strecke“ bezeichnet. Die sich ergebende, vereinfachte Funktionsstruktur bildet die Grundlage für die Bildung unterschiedlicher Modularisierungsvarianten (siehe Abb. 33).

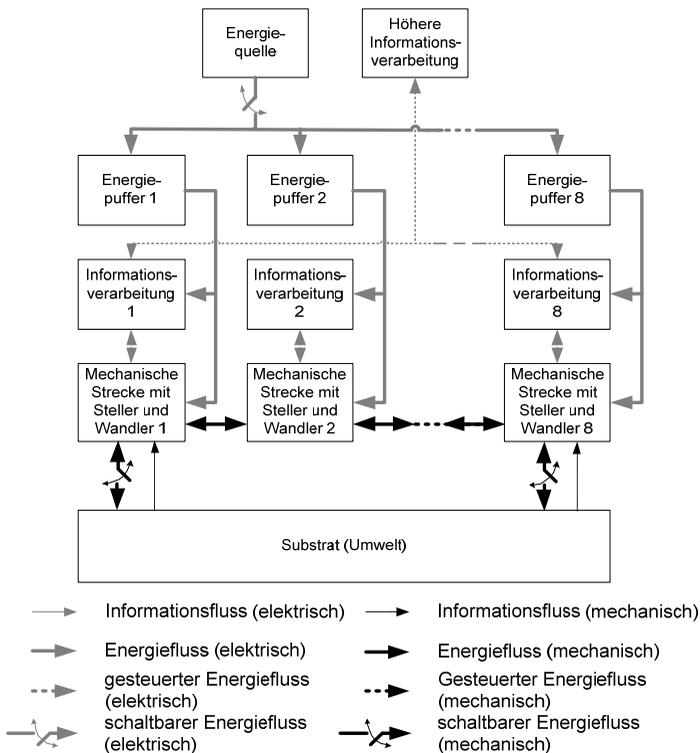


Abb. 33 – Vereinfachte Darstellung der Gesamtstruktur. Blöcke mit einfacher Kopplung können zusammengefasst werden. Das System dient als Referenz für die Bewertung der unterschiedlichen modularen Varianten

Die Struktur entspricht der eines Mehrachsanantriebs mit acht Achsen. Diese allgemeine Betrachtung soll die Möglichkeit einer Erhöhung der Anzahl der Antriebe einbeziehen. Die Funktionen „Energiequelle“ sowie „höhere Informationsverarbeitung“ werden bei dieser Betrachtung nicht mit einbezogen, da „Energiequelle“ eine externe Funktion ist und die „höhere Informationsverarbeitung“ eine in sich geschlossene Funktion dargestellt. Die Funktionen „Mechanische Strecke 1“ bis „Mechanische Strecke 8“ werden nicht zusammengefasst, da dieses Vorgehen der Idee der Modularisierung des Bewegungssystems zuwider wäre. Die triviale Lösung in Form eines Gesamtmoduls scheidet aus der Betrachtung aus, käme diese doch der Entwicklung eines integrierten Systems gleich. Betrachtet werden die Funktionen „Energiepuffer“ und „Informations-verarbeitung“, welche auf unterschiedliche Weise kombiniert werden können.

5.2.3 Varianten eines modularen Systems

Als Referenzvariante und somit als Variante „Ref“ wird das System betrachtet, wie es in der Abb. 33 dargestellt ist. Dieses System ist nicht zusammengefasst und sollte somit als pessimaler Fall für eine mögliche Modularisierung stehen. Die Strukturdarstellungen der Varianten sind im Anhang im Kap. A.1ff. zu finden.

Das integrierte Modul wird als Variante „ $E_{int}I_{int}$ “ betrachtet. Hier werden jeweils die Energiepuffer, die Informationsverarbeitung und die mechanische Strecke in ein Modul integriert. Die sich ergebende Struktur ist sehr einfach und zeichnet sich durch eine geringe Anzahl informationstechnischer und energetischer Kopplungen aus.

Die Variante „ $E_{zen}I_{zen}$ “ ergibt sich durch Zusammenfassen einerseits der Energiepuffer und andererseits der Informationsverarbeitungen zu jeweils einem Modul. Das Ergebnis führt zu zentralisierten Funktionselementen. Der Vorteil liegt in der Nutzung dieser Elemente für alle Module.

Die Varianten „ $E_{zen}I_{int}$ “ und „ $E_{int}I_{zen}$ “ sind als Mischlösungen aus der integrierten und der zentralisierten Lösung zu sehen. Eine zentrale Energiezwischenspeicherung und die integrierte Informationsverarbeitung sind in Variante „ $E_{zen}I_{int}$ “ umgesetzt, die integrierte Energiezwischenspeicherung und die zentrale Informationsverarbeitung in Variante „ $E_{int}I_{zen}$ “.

5.2.4 Bewertung der Modularisierungsvarianten

Zur Bewertung wird ein System mit zwei Greifern und sechs Bewegungsachsen betrachtet. Bewertet werden die unterschiedlichen modularen Varianten anhand der Kriterien:

- Anzahl der Kopplungsstellen an den Modulen
 - informationelle
 - energetisch-mechanisch
 - energetisch-elektrisch
- Entwicklungsaufwand
 - Anzahl unterschiedlicher Modultypen
 - Anzahl der Funktionen umgesetzt in Modultypen

Die Anzahl der Kopplungen spiegelt den konstruktiven Aufwand der Verbindungen zwischen den Modulen wider. Gezählt werden die ein- und ausgehenden Kopplungen der Funktionsblöcke innerhalb des gesamten Systems. So soll der Unterschied zwischen busfähigen und nicht-busfähigen Kopplungen abgebildet werden.

Die Unterscheidung in informationelle, energetisch-mechanische und energetisch-elektrische Kopplungen erfolgt unter dem Gesichtspunkt des Aufwands zur physischen und funktionellen Realisierung. Eine energetisch-elektrische Kopplung erfordert weniger Aufwand als eine energetisch-mechanische. Den höchsten Aufwand erfordert die informationelle Kopplung.

Die Anzahl der unterschiedlichen Modultypen bildet den Aufwand bei der Entwicklung der Module für das modulare System ab. Je weniger Typen entwickelt werden, desto besser ist die Modularisierung. Das Ergebnis einer Optimierung nur unter diesem Gesichtspunkt wäre die Integration aller Funktionen in einem Modul. Als konkurrierendes Kriterium wird die Anzahl der Funktionen betrachtet, welche in Summe in den unterschiedlichen Modulen integriert werden. Ein Zusammenfassen gleicher Funktionen in einem Modul sorgt für eine geringe Modulanzahl, anders als die Aufteilung in viele identische Module.

Tab. 9 – Quantifikation der Kopplungen und des Entwicklungsaufwands

Kriterien		Variante Referenz	Variante E _{int} I _{int}	Variante E _{zen} I _{zen}	Variante E _{zen} I _{int}	Variante E _{int} I _{zen}
Kopplung	informationell	25	8	17	9	18
	mechanisch	48	16	20	18	18
	elektrisch	33	9	12	11	10
Entwicklungsaufwand	Modulanzahl	24	9	10	9	11
	Summe der Funktionen	24	24	10	17	18

Alle Kriterien sind so formuliert, dass jeweils eine geringe Punktzahl anzustreben ist. Die entsprechenden Funktionsstrukturen sind im Anhang A.1 zu finden. Für eine differenzierte Bewertung der unterschiedlichen Varianten werden die Wichtungsfaktoren festgelegt. Die informationelle Kopplung ist in der Umsetzung die schwierigste. Diese muss sowohl physisch hergestellt werden, als auch die Informationsübertragung realisiert werden. Die energetisch-elektrische Kopplung ist als die Kopplung mit geringem Aufwand einzuschätzen, da auf viele Standardkomponenten zurückgegriffen werden kann. Die mechanische Kopplung wird vom Aufwand her als „mittel“ eingestuft.

Ein geringer Aufwand bezogen auf die Modulentwicklung ist wichtiger einzustufen als eine geringe Anzahl der Kopplungen zwischen den Modulen. Dabei ist das Ziel der Modularisierung, ein System mit geringer Anzahl an unterschiedlichen Modulen, als das zentrale anzusehen. Die Summe der unterschiedlichen Funktionen ist als zweitrangig zu sehen.

Es ergeben sich rechnerisch die Wichtungsfaktoren dargestellt in Tab. 10. Für die Bewertung werden diese zusammen mit den in Tab. 9 ermittelten Werten verrechnet. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Tab. 11 zu sehen. Die Varianten heben sich mit 42 % bis 54 % stark mit von der Referenzvariante ab. Damit stellt jede Modularisierungsvariante eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Ausgangssystem dar. Unter einander differenzieren die Varianten nicht stark.

Tab. 10 – Berechnung der Wichtungsfaktoren für die Modularisierungsbewertung

Bewertung der Wichtigkeit des Kriterium in Zeile gegenüber dem Kriterium in Spalte: 3 = wichtiger 2 = gleich 1 = unwichtiger	informationelle Kopplung	mechanische Kopplung	elektrische Kopplung	Modulanzahl	Anzahl der Funktionen	Summe/Gesamt-punkte	Wichtungsfaktor
informationelle Kopplung		3	3	3	3	$\frac{12}{40}$	0,30
energetisch-mechanische Kopplung	1		3	1	1	$\frac{6}{40}$	0,15
energetisch-elektrische Kopplung	1	1		1	1	$\frac{4}{40}$	0,10
Modulanzahl	1	3	3		3	$\frac{10}{40}$	0,25
Anzahl der Funktionen	1	3	3	1		$\frac{8}{40}$	0,20

Die Variante „E_{zen}I_{int}“ als am besten bewertete Variante zeichnet sich vor allem durch die geringe Anzahl informationeller Kopplungen und die Ausgeglichenheit in allen anderen Kriterien aus. Dies wird hauptsächlich durch die Integration der antriebsnahen Informations-verarbeitung und der zentralen Energieversorgung erreicht.

Die Variante „E_{int}I_{int}“ ist die Variante mit den meisten Bestbewertungen. Sie zeichnet sich durch die geringste Anzahl der Kopplungen zwischen den Modulen aus. Auch die Anzahl der Module ist die geringste. Der negative Punkt ist die hohe Anzahl der Funktionen, welche in Summe integriert werden müssen. Die schlechteste der Modularisierungsvarianten ist die Variante „E_{int}I_{zen}“.

Tab. 11 – Bewertungstabelle der unterschiedlichen Modularisierungsvarianten. (Mit grüner Farbe ist die am besten bewertete Variante hinterlegt.)

Kriterium	W	Referenz		$E_{\text{inI}_{\text{int}}}$		$E_{\text{zenI}_{\text{zen}}}$		$E_{\text{zenI}_{\text{int}}}$		$E_{\text{intI}_{\text{zen}}}$	
		P_{V1}	$W \cdot P_{V1}$	P_{V2}	$W \cdot P_{V2}$	P_{V3}	$W \cdot P_{V3}$	P_{V4}	$W \cdot P_{V4}$	P_{V5}	$W \cdot P_{V5}$
informationelle Kopplung	0,3	25	7,5	8	2,4	18	5,4	9	2,7	18	5,4
mechanische Kopplung	0,15	48	7,2	16	2,4	20	3,0	18	2,7	18	2,7
elektrische Kopplung	0,10	33	3,3	9	0,9	12	1,2	11	1,1	10	1,0
Modulanzahl	0,25	24	6,0	9	2,3	10	2,5	9	2,3	11	2,8
Summe der Funktionen	0,20	24	4,8	24	4,8	10	2,0	17	3,4	18	3,6
Summe	1,00	28,8		12,8		14,1		12,2		15	
P_{Vx}/P_{V1}		100%		44%		49%		42%		54%	

Auf Grundlage des Ergebnisses der Bewertung wird eine Umsetzung der Variante „ $E_{\text{zenI}_{\text{int}}}$ “ mit zentraler Energiespeicherung und in die Module integrierter Informationsverarbeitung umgesetzt. Die Aufgabe des Greifens wird durch Greifmodule erfüllt, Bewegungsmodule erzeugen die Relativbewegung für Loko- und Idiomotion.

5.3 Zusammenfassen der Ergebnisse der Modularisierung

Die mechanischen Schnittstellen reduzieren sich auf Kopplungen zwischen

- dem Substrat und den Greifmodulen,
- den Greifmodulen und den Bewegungsmodulen und
- dem Energiespeicher und einem beliebigen Bewegungs- oder Greifmodul.

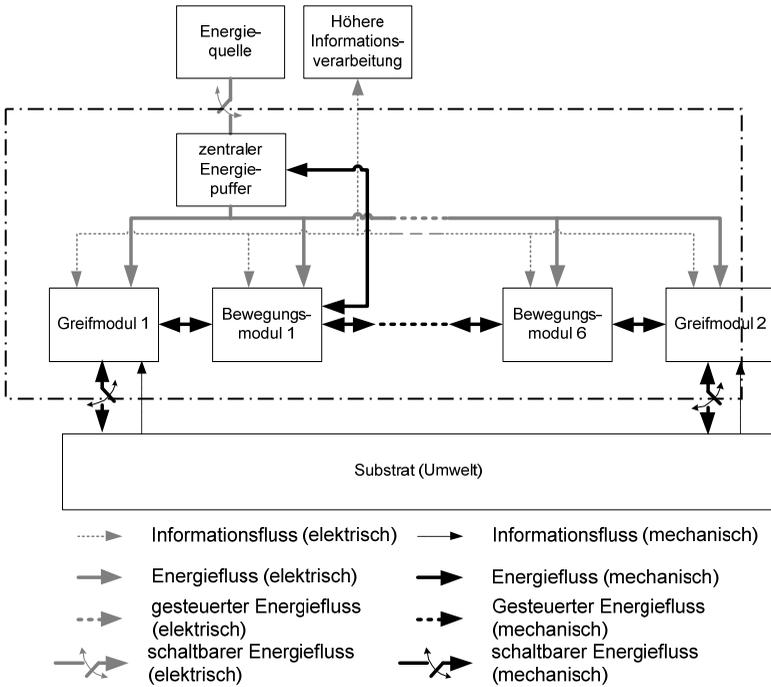


Abb. 34 – Optimale Variante des modularen Systems für den Kletterroboter

Die Struktur des Referenzsystems mit zwei Greifern und sechs Bewegungsmodulen ist abgebildet. Die Funktionen des Greifens und der Bewegungserzeugung werden in den Greifmodulen respektive den Bewegungsmodulen implementiert. Die Energiespeicherung wird in einem Modul umgesetzt.

Die elektrischen Schnittstellen stellen sich dar als Kopplungen zwischen

- dem Energiespeicher und den Greif- und Bewegungsmodulen als Busstruktur und
- der externen Energiequelle und dem Energiespeicher in trennbarer Ausführung

Die informationellen Schnittstellen sind festgelegt auf Kopplungen zwischen

- einer höheren Informationsverarbeitung und den Greif- und Bewegungsmodulen über ein Bussystem.

KAPITEL 6

Entwicklung der Schnittstelle

„Das Huhn war die Idee des Eis, wie man mehr Eier erzeugt.“

Samuel Butler

6.1 Anforderungen für die Entwicklung der Schnittstelle

6.1.1 Schnittstelle als Koppelsystem

Für mechatronische Module muss die Schnittstelle somit in den Domänen zur Übertragung von Energie-, Stoff- und Information ausgelegt sein. Die Funktion der Schnittstelle besteht in der Übertragung von Information, Energie und Stoff. Betrachtet man die Übertragung von Information und Stoff, dann ist mit dieser Übertragung auch immer eine Energieübertragung verbunden. Informationen werden zumeist über elektrische Größen wie Spannung oder Strom übertragen. Für den Stofffluss ist immer ein Potential, meist ein Druckpotential notwendig. Somit liegt die Funktion der Schnittstelle in der Übertragung von Energie.

Die Teilsysteme sind untereinander energetisch gekoppelt, es findet eine Energieübertragung zwischen den Teilsystemen, in diesem Fall, den Modulen statt. Die Energie sei ausschließlich über die Schnittstelle übertragen (vgl. [Lenk et al. 2001]).

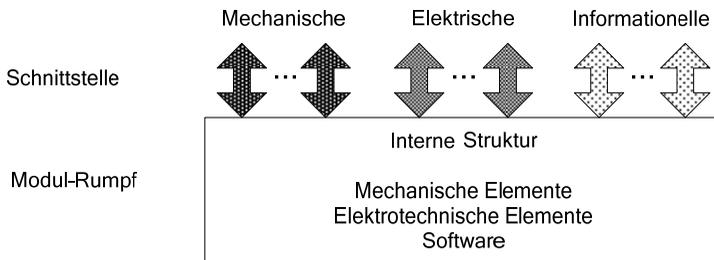


Abb. 35 – Modul mit Schnittstelle. Diese setzt sich aus mechanischen, elektrischen und informationellen Komponenten zusammen.

Die energetischen Kopplungen können dabei auf unterschiedlichen physikalischen Phänomenen beruhen. Wird Energie über eine bestimmte Zeit übertragen, findet ein Leistungsfluss statt. In Tab. 12 sind Leistungen physikalischer Größen dargestellt, welche über die Schnittstelle übertragen werden. Die Leistung berechnet sich aus dem Produkt der Flussgröße und der Potentialgröße, analog in den verschiedenen physikalischen Domänen.

Tab. 12 – Analogien zwischen physikalischen Domänen in Bezug auf die Leistung

Domäne	Größe	Leistung	Widerstand	Flussgröße	Potentialgröße
Mechanik	mechanisch translatorisch	$P_t = Fv$	$R_t = \frac{v}{F}$	Kraft F	Geschwindigkeit v
	mechanisch rotatorisch	$P_{rot} = M\omega$	$R_r = \frac{\omega}{M}$	Moment M	Winkelgeschwindigkeit ω
Elektrotechnik	elektrisch	$P_{el} = UI$	$R_{el} = \frac{U}{I}$	Strom I	Spannung U

Zwischen den Modulen muss an der Schnittstelle Energie übertragen werden. Der Widerstand lässt sich im Allgemeinen aus dem Quotienten von Potential- und Flussgröße berechnen. Für die Dimensionierung der Schnittstelle lassen sich unter der Forderung eines geringen Widerstands zwei Forderungen ableiten.

1. Die Potentialgröße soll an der Schnittstelle gegen Null gehen, damit die Leistungsaufnahme gegen Null geht.
2. Die Schnittstelle muss ausreichend dimensioniert sein, damit die Flussgröße in maximaler Ausprägung übertragen werden kann.

6.1.2 Interne Struktur der Module

Die Schnittstellen sind standardisierte Komponenten eines mechatronischen Systems. Über sie werden Module gleicher oder unterschiedlicher Funktionen

und Gestalt miteinander gekoppelt. Ein Modul, welches nicht über eine Schnittstelle verfügt, kann nicht in ein solches System integriert werden.

Bei der Entwicklung eines mechatronischen Systems, welches kompatibel zu einem modularen System ausgeführt sein soll, muss primär auf die Integration der Schnittstelle Wert gelegt werden. Um Entwicklungszeit und -kosten gering zu halten, wird ein Modul aus standardisierten, dem modularen System kompatiblen sowie funktionsangepassten Komponenten aufgebaut (vgl. [Zöppig et al. 2005]).

Die Schnittstelle und schnittstellennahe Komponenten können demnach als einheitliche Komponenten betrachtet werden. Einheitlich unter dem Gesichtspunkt, dass sie innerhalb der Module identisch ausgeführt sind.

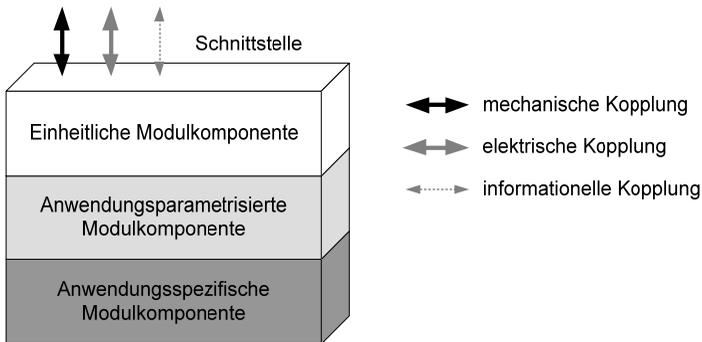


Abb. 36 – Konzept für die interne Modulstruktur. Die Unterteilung der Modulkomponenten in einheitliche, anwendungsparametrisierte und anwendungsspezifische Module dient der Reduktion des Entwicklungsaufwands.

Anwendungsspezifische Komponenten sind zum Beispiel Aktoren und Sensoren. Diese werden entsprechend den funktionellen Forderungen der Module ausgewählt und sind nicht zwangsläufig kompatibel zu der Schnittstelle.

Diese Anpassungsfunktion erfüllen die so genannten anwendungsparametrisierten Komponenten. Diese sind zwar standardisiert in ihrer Funktion, müssen aber in den technischen Parametern an die spezifischen Komponenten angepasst sein. In Bezug auf Aktoren können dies beispielsweise die Endstufen sowie bezogen auf Sensoren beispielsweise die Signalanpassung sein.

6.2 Mechanische Struktur

6.2.1 Modulinterne Struktur der Mechanik

Die mechanisch gekoppelten Module sind Bewegungs-, Greif- und Energiespeichermodule. Diese müssen eine einheitliche, standardisierte Schnittstelle besitzen, die als einheitliche Komponente in jedes Modul integriert wird. Diese Schnittstelle bietet die einzige Möglichkeit der Kopplung zu anderen Modulen.

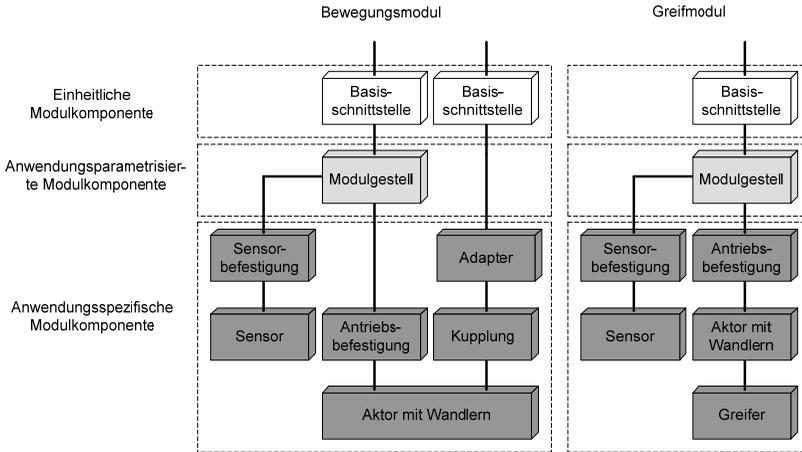


Abb. 37 – Modul-interne mechanische Struktur der Module

Betrachtet man das Bewegungsmodul, so dient es zur Erzeugung einer relativen Bewegung zwischen zwei oder mehreren Schnittstellen. Der benötigte Antrieb muss mit einem Modulgestell verbunden werden. Die Relativbewegung entsteht zwischen Modulgestell und Abtrieb des Antriebs. Diese beiden Komponenten müssen jeweils mit einer oder mehreren Schnittstellen versehen sein (vgl. Abb. 37).

Die Vielfalt bei den elektromechanischen Wandlern ist enorm. Die Auswahl muss anwendungsspezifisch getroffen werden, eine standardisierte oder beliebig skalierbare Lösung ist nicht möglich.

Das Greifmodul muss wie das Bewegungsmodul über eine standardisierte und somit einheitliche Schnittstelle verfügen, um eine Kompatibilität zum modularen System zu gewährleisten. Das Modulgestell kann als parametrisierbare Modulkomponente oder als anwendungsspezifische Modulkomponente ausge-

legt werden. Die übrigen mechanischen Komponenten des Moduls sind ähnlich wie beim Bewegungsmodul anwendungsspezifisch.

6.2.2 Ausführung der mechanischen Schnittstelle

Die mechanische Schnittstelle ist für die mechanische Kopplung der Module untereinander zuständig. Man kann in der modularen Robotik grundsätzlich zwei verschiedene Konzepte unterscheiden: Es bietet sich einerseits die Möglichkeit, Module direkt miteinander mechanisch zu koppeln, wie dies beispielsweise beim System POLYBOT realisiert wurde. Das System TOPOBO zeigt eine weitere Möglichkeit auf. Hier werden die bewegungserzeugenden Module über passive Koppellemente verbunden, bzw. können die Module direkt aneinander gekoppelt werden. Dies führt zu einer hohen Gestaltvariabilität.

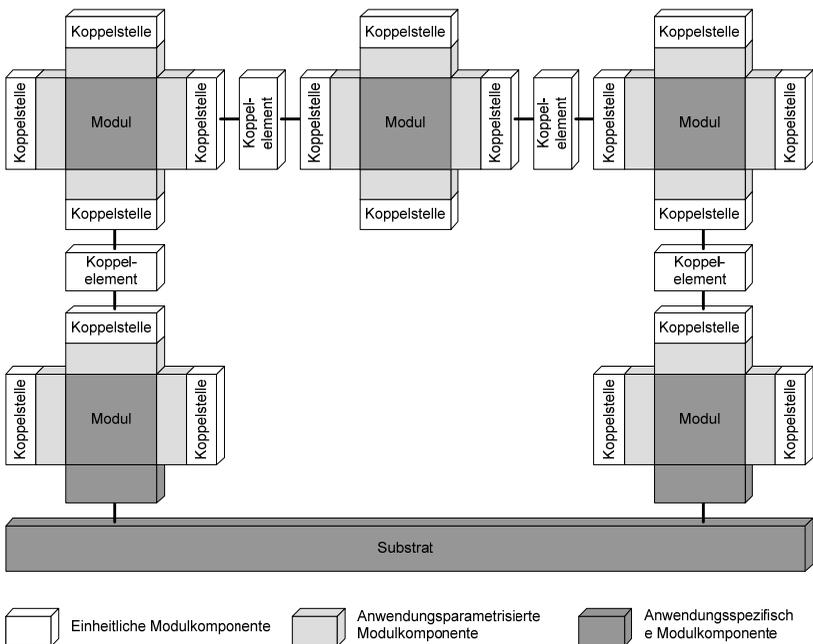


Abb. 38 – Struktur des modularen Systems in der mechanischen Domäne

Eine derartige Variabilität kann ebenfalls dadurch erzeugt werden, dass ein Modul über eine hohe Anzahl potentieller Schnittstellen verfügt. Diese sollten so gestaltet sein, dass zwei unterschiedliche Module in einer hohen Anzahl möglicher Lagen zu einander angeordnet werden können. Die Lage beschreibt einerseits die relative Orientierung und andererseits die relative Position der Module zu einander. Eine Variante besteht darin, unterschiedliche Koppelemente zu realisieren und diese an mehreren identischen mechanischen Schnittstellen an den Modulen zu befestigen.

Damit ergibt sich eine mechanische Struktur, wie sie in Abb. 38 dargestellt ist. Die Module verfügen in Richtung der mechanischen Schnittstelle über die standardisierte Koppelstelle. Die innere Struktur setzt sich aus anwendungsparametrisierten bzw. anwendungs-spezifischen Komponenten zusammen.

6.2.3 Dimensionierung der mechanischen Schnittstelle

Die mechanischen Flussgrößen Kraft und Moment sind abhängig von der Masse des Gesamtsystems. Die entscheidende Einflussgröße ist die Masse m_{RS} des Referenzsystems. Aus dem Stand der Technik wird eine Masse von $m_{RS} \leq 2 \text{ kg}$ abgeleitet. Unter der Maßgabe, dass ein quasistatisches Klettern umgesetzt werden soll, werden Trägheitskräfte nicht direkt berücksichtigt. Orientiert an den recherchierten Systemen, ist eine Modulgröße mit einer Kantenlänge von $50 \text{ mm} \leq l_M \leq 60 \text{ mm}$ realistisch.

Die Aufgabe der mechanischen Schnittstelle besteht in der Übertragung der mechanischen Flussgrößen Moment M_S und Kraft F_S . Um den Wert der Größen abzuschätzen, wird das in Abb. 23 (S. 66) dargestellte Modell für die mechanische Struktur des Referenzsystems herangezogen. Bei einer Verwendung von $n_{RS} = 8$ Modulen, einer angestrebten Modullänge von $l_M = 0,05 \text{ m}$ liegt die durchschnittliche Masse eines Moduls bei $m_M = 0,250 \text{ kg}$.

Unter Verwendung der Formel (7) lässt sich das erforderliche Antriebsmoment eines Moduls berechnet zu

$$M_{An,erf} = \frac{1}{2} l_M g m_M (6,5)^2 \quad (8)$$

$$M_{An,erf} = 2,6 \text{ Nm}$$

Das über die Schnittstelle zu übertragende Moment M_S berechnet sich mit einem Sicherheitsfaktor von $S_S = 1,5$ zu

$$M_s = \frac{1}{2} S_s n_{RS} m_{RS} g l_M \approx 6 \text{ Nm} . \quad (9)$$

Die zu übertragende Kraft F_S wird entsprechend mit

$$F_s = S_s m_{RS} g \approx 30 \text{ N} \quad (10)$$

berechnet. Diese Belastungen sind einerseits über die Schnittstelle zu übertragen, aber andererseits auch über die Schnittstelle zwischen Greifmodul und Substrat.

Die Kraft wird über eine kraftschlüssige Verbindung auf das Modul übertragen. Mit Hilfe einer Schraubenverbindung wird das Koppellement auf dem Modul verklemt. Verwendet werden pro Koppelstelle vier Schrauben mit dem Gewinde M3. Der Abstand der im Quadrat angeordneten Bohrungen beträgt 34 mm (vgl. Abb. 39) und ist damit angepasst auf eine Modullänge von etwa 50 mm . Eine Nachrechnung der Schraubenverbindung befindet sich im Anhang in Kap. A.3.1.

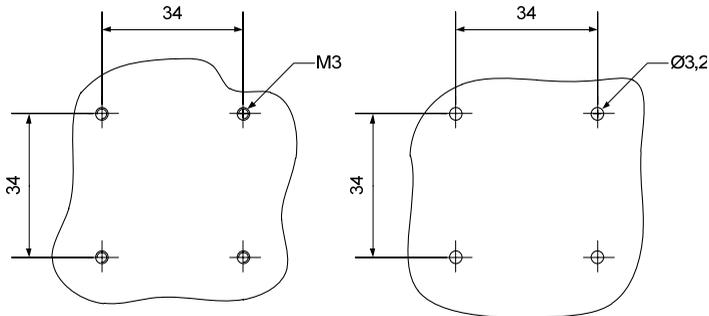


Abb. 39 – Zeichnung der einheitlichen mechanischen Schnittstelle. Links: Standardisierte Koppelstelle der Module bestehend aus vier Gewindebohrungen M3, rechts: Koppelstelle im Koppellement bestehend aus vier Durchgangsbohrungen mit einem Durchmesser von $3,2 \text{ mm}$

6.3 Elektrisches System

6.3.1 Modulinterne Struktur der leistungselektronischen Komponenten

Die Domäne der Elektrotechnik beschäftigt sich einerseits mit der elektrischen Energieversorgung, andererseits ist sie eine Komponente des informationsverarbeitenden Systems. Die elektronischen informationsverarbeitenden

Komponenten werden im Kap. 6.4 behandelt. In diesem Unterkapitel sei die Energieversorgung betrachtet.

Die Bewegungs- und Greifmodule müssen mit elektrischer Energie versorgt werden. Die Flussgröße für diese Schnittstelle ist der Strom I , die Potentialgröße ist die Spannung U . Über eine elektrische Koppelstelle werden die Funktionsmodule an einen Energiebus angeschlossen und entnehmen diesem die benötigte Energie. Der Energiespeicher speist den Bus, er selber muss über eine Ladeschnittstelle erneut gefüllt werden.

Auch hier ist es sinnvoll, eine modulübergreifende Schnittstelle zu schaffen und diese als einheitliche Modulkomponente auszuführen. Weiterhin können die Pegelanpassung für Logikbausteine und einige informationsverarbeitende Komponenten für alle Greif- und Bewegungsmodule einheitlich ausgeführt werden.

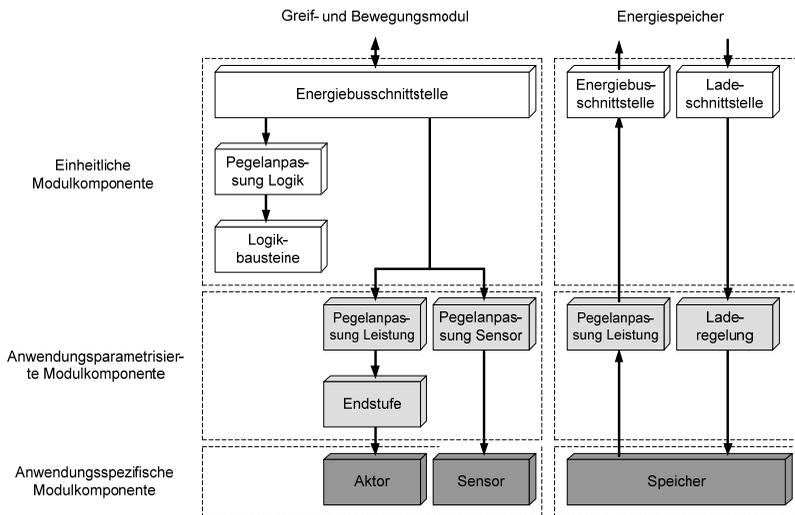


Abb. 40 – Allgemeine modul-interne elektrische Struktur. Begründet in der Funktion ist hierbei die Struktur der Bewegungs- und der Greifmodule von der Struktur des Energiespeichers zu unterscheiden.

Die Aktoren und Sensoren sind anwendungsspezifisch auszulegen. In Anbetracht des hohen Standardisierungsniveaus bei elektronischen Bauteilen können Pegelanpassungs- und Endstufenkomponenten als anwendungspara-

metrisierbar betrachtet werden. Die Funktion dieser Komponenten ist identisch, anhand der Leistungsaufnahme, Spannungs- und Stromparameter von Aktoren und Sensoren können diese parametrisiert werden.

Das Energiespeichermodul muss ebenfalls über eine Verbindung zum Energiebus verfügen. Der eigentliche Speicher kann anwendungsspezifisch ausgewählt werden und über eine evtl. notwendige Pegelanpassung an den Energiebus angekoppelt werden. Gegebenenfalls ist die Laderegelung notwendig. Dies hängt vom verwendeten Speichermedium ab. Auch die Verwendung mehrerer Speichermodule ist bei einer einheitlichen Schnittstelle möglich.

6.3.2 Ausführung der elektrischen Schnittstelle

Anders als bei der mechanischen Schnittstelle muss die elektrische Schnittstelle nicht variabel ausgeführt werden. Die elektrische Energie wird über ein Zweileitersystem übertragen. Die Module werden untereinander im Daisy-Chain- oder Vorrangprinzip verschaltet. Ein Modul verfügt über zwei Koppelstellen, einen „Eingang“ und einen „Ausgang“. Diese sind direkt gekoppelt (vgl. Abb. 41). Der Vorteil liegt in der einfachen Verlegung der elektrischen Leiter.

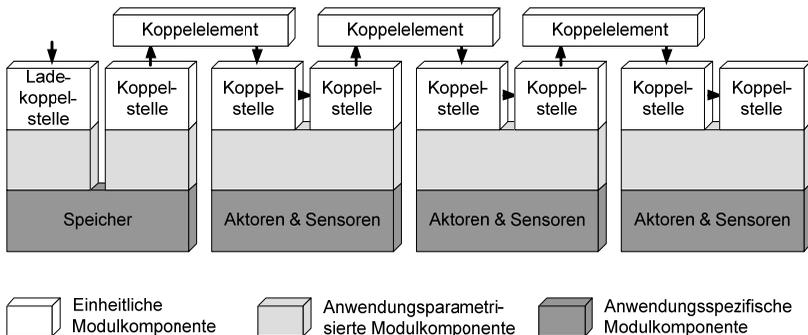


Abb. 41 – Konzept der Energieversorgung. Die Module sind im Daisy-Chain-Prinzip verschaltet. Es existiert eine Koppelstelle, mit Hilfe derer der Energiespeicher geladen wird. Alle Verbraucher werden seriell an den Speicher angekoppelt.

Ein Nachteil liegt darin, dass der Strom für das letzte Modul durch das erste Modul fließen muss. Bei diesem Prinzip sollten die Module mit einer hohen Leistungsaufnahme nah an dem Energiespeicher sein. Der Spannungsabfall über den Bus ist bei kurzen Leitungen hinreichend gering.

6.3.3 Dimensionierung der Schnittstelle

Der zu übertragende Strom für das Gesamtsystem wird auf $I_{max} = 10\text{ A}$ begrenzt. Bei einer angenommenen Leiterlänge von $l_L = 2\text{ m}$ und einem Querschnitt von $A_L = 1\text{ mm}^2$ ergäbe sich ein Leiterwiderstand von $R_L = 24\text{ m}\Omega$ für Kupfer. Dies bedeutete einen Spannungsabfall von $U_L < 0,3\text{ V}$, dieser ist vernachlässigbar.

Handelsübliche industrielle Konnektoren für diesen Bereich sind erhältlich. Die üblichen Spannungen elektro-magneto-mechanischer Wandler liegen im Bereich von 6 V bis 24 V . Durch entsprechende Auswahl der Antriebe lassen sich Leistungen von 120 W respektive 240 W im Gesamtsystem umsetzen. Ein üblicher Spannungswert liegt bei 12 V . Systeme im Modellbaubereich werden mit 6 V (Versorgung durch NiMH-Zellen á $1,2\text{ V}$) oder $7,4\text{ V}$ (Versorgung durch LiPo-Zellen á $3,7\text{ V}$) ausgelegt.

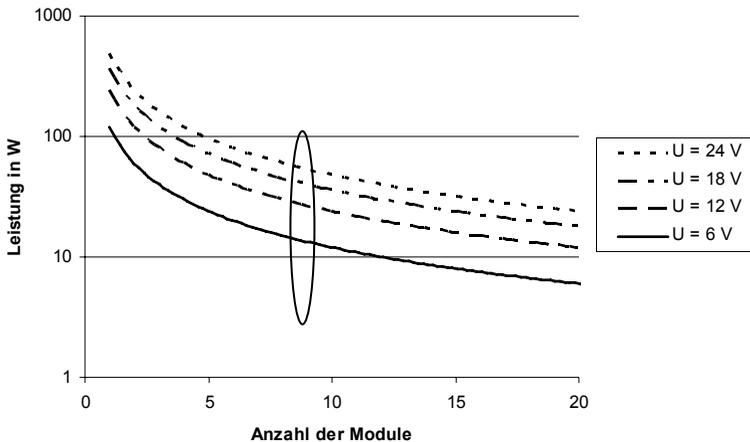


Abb. 42 – Berechnung der durchschnittlichen Leistungsaufnahme eines Moduls. Bei einem maximalen Strom von $I = 10\text{ A}$ kann in Abhängigkeit der Anzahl der Module im Gesamtsystem die maximale Leistungsaufnahme berechnet werden. Bei der im Referenzsystem vorhandenen Anzahl von 8 Modulen (markiert in der Grafik) liegt die Leistungsaufnahme pro Modul von $P = 15\text{ W}$ (bei 6 V) bis $P = 60\text{ W}$ (bei 24 V Versorgungsspannung)

6.3.4 Modulinterne Struktur der elektronischen Teildomäne

Das Prinzip einer standardisierten Informationsverarbeitung für modulare Systeme ist in [Zöppig et al. 2005] dargestellt. Als einheitliche Modulkompo-

nente ist hier die modul-interne Datenverarbeitung in Form eines Mikrocontrollers beschrieben. Er besitzt eine Kommunikationsschnittstelle, die funktionell in eine Schnittstelle zu dem Informationsbus und in eine Schnittstelle zum Programmieren des Mikrocontrollers unterteilt ist. Die Schnittstelle zum Informationsbus dient der Übertragung von Soll- und Istgrößen, Zustandsgrößen oder anderer Messgrößen (vgl. Abb. 43).

Als weitere Komponenten gibt es Koppelstellen zu Aktoren und Sensoren. Hier ist das Niveau der Standardisierung sehr hoch. Die meisten Mikrocontroller haben verschiedene, standardisierte digitale und analoge Schnittstellen implementiert, so dass man eine Vielzahl unterschiedlicher Aktoren und Sensoren an den Mikrocontroller koppeln kann.

Diese Komponenten als anwendungsspezifische Komponenten müssen ggf. mittels signalanpassenden respektive verstärkenden Komponenten angekoppelt werden. Hier kann auf funktionell ähnliche, in ihren technischen Parametern aber differenzierte Komponenten zurückgegriffen werden. Diese Komponenten sind zumeist auch mit zusätzlicher Energie zu versorgen.

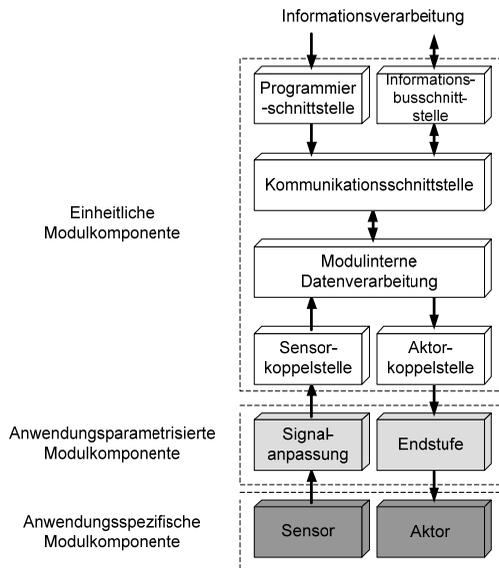


Abb. 43 – Allgemeine modulinterne informationsverarbeitende Struktur. Diese Struktur wird in den Bewegungs- und den Greifmodulen umgesetzt (nach [Zöppig et al. 2005]).

6.3.5 Ausführung der elektronischen Struktur

Die Datenkommunikation erfolgt in einem Datennetz. Innerhalb dieses Netzes werden Daten übertragen. Netze können in unterschiedlichen Topologien ausgeführt werden. Übliche Strukturen sind linien-, ring-, sternförmige und vermaschte Netze. Eine Übersicht wird gegeben in [Schneider et al. 2001, S. 157 ff.]. Für das modulare System bietet sich eine linienförmige Netzwerkstruktur an, bedingt durch die kettenförmige oder schwach verzweigte mechanische Struktur.

Sind mehrere Systeme über eine Schnittstelle gekoppelt, spricht man von einem Bus. Der entscheidende Vorteil der Bussysteme ist der geringe Aufwand bei der Verkabelung mehrerer Module. Die leichte Erweiterbarkeit durch eine Erhöhung der Kommunikationsteilnehmer hat dazu beigetragen, dass sich eine breite Anzahl unterschiedlicher Bussysteme etabliert haben.

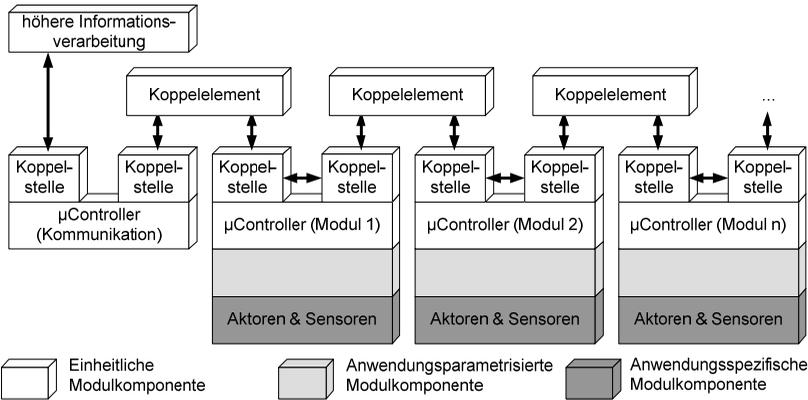


Abb. 44 – Das Informationsbussystem des modularen Systems. Es ist analog zum elektrischen System als „Daisy-Chain“ verschaltet. Die Anbindung erfordert die Verwendung eines weiteren Mikrocontrollers für die Herstellung der Kommunikation mit der höheren Informationsverarbeitung.

Ein Bussystem hat Adress-, Steuer- und Datenübertragungsfunktionen. Grundsätzlich kann zwischen parallelen und seriellen Bussen unterschieden werden. Beim parallelen Bus gibt es für die Funktionen getrennte Leiter, bei seriellen Bussen werden die Funktionen auf einem Leiter als Datenpaket übertragen. Das Datenpaket besteht dabei aus Steuer-, Adress- und Datenteil. Unter dem Aspekt der Modularisierung bietet der serielle Bus mit seinem geringen Verkabelungsaufwand einen Vorteil. Der Nachteil, dass serielle Busse

Die modulinterne Struktur entspricht der eines allgemeinen Regelkreises. Die Messsignale werden eingelesen und daraus mittels Kalibrierparameter die Messgrößen berechnet. Durch einen Soll-Ist-Vergleich werden die Regelabweichungen ermittelt. Mittels einer Regelvorschrift werden Stellgrößen berechnet, die intern in Stellsignale umgewandelt werden. Diese werden an das Stellglied übermittelt. Die Messgrößen können über den Informationsbus an die höhere Informationsverarbeitung gesendet werden. Vice versa werden Sollgrößen an die Module gesendet (vgl. Abb. 45).

6.4.2 Kommunikationsschnittstelle

Als Grundlage der Entwicklung des Kommunikationsprotokolls dient das OSI-Referenzmodell [Schneider et al. 2001, S. 200 ff.]. Bei der Verwendung eines seriellen Busses müssen unterschiedliche Kriterien beachtet werden, welche den Bus charakterisieren. Dazu zählen u. a. die Anzahl der Busmaster und -slaves.

Ein Master steuert die Datenkommunikation. Er reserviert den Bus für die Kommunikation und gibt diesen auch wieder frei. Er sendet Aufforderungen an Slaves. Diese können einzig den Aufforderungen entsprechend Daten senden oder empfangen. Bei einer Master-Slave-Struktur ist der Master an der gesamten Kommunikation beteiligt. Ein Slave kann nicht direkt mit einem anderen Slave Daten austauschen; dies muss immer über einen Master erfolgen. Dies kann sich nachteilig auswirken, wenn der Master dadurch zu stark belastet wird. Allerdings ist die Latenz meist geringer als bei Multi-Master-Systemen.

Gibt es mehr als einen Master, wird der Bus arbitriert. Jener Master, welcher eine Datenübertragung ausführen will, muss vorher den Bus reservieren und nach Abschluss der Übertragung wieder freigeben. Dies kann zentral oder dezentral geschehen. Eine zentrale Arbitrierung benötigt einen Arbitrier, der die Reservierung des Busses auf eine Anfrage der Master koordiniert. Bei einer dezentralen Arbitrierung kann jeder Master den Bus reservieren und freigeben. Dies kann zu Kollisionen führen, wenn zwei Master gleichzeitig den Bus reservieren wollen.

Eine Möglichkeit, dies zu vermeiden, ist das so genannte Token-Verfahren. Hier werden die Lese- und Schreibrechte in einer vorher definierten Reihenfolge von Master zu Master weitergegeben. Kollisionen werden so vermieden, eine maximale Antwortzeit kann garantiert werden, was zu einer Echtzeitfähigkeit führt.

higkeit des Busses führt. Weitere Informationen sind in [Schneider et al. 2001] detailliert.

6.4.3 Ableiten der Anforderungen für die Schnittstelle

Im modularen System soll jedes Modul gleichberechtigt im Bussystem sein. Eine Echtzeitfähigkeit ist gewünscht. Aus diesem Grund wird ein Multi-Master-System gewählt, die Arbitrierung innerhalb des Busses erfolgt nach dem Token-Verfahren.

In der Industrie weit verbreitet sind der CAN-Bus, der Profibus, der I²C-Bus. Ein Bussystem mit nur einem Signalleiter wird in [Zykov et al. 2007] vorgestellt. Dabei handelt sich um das Bussystem, welches innerhalb des modularen Robotersystems MOLECUBES verwendet wird. Basis ist UART-Schnittstelle, der Bus wird physisch mit nur einer Datenleitung realisiert. Es handelt sich in dieser Ausführung nicht um ein industriell standardisiertes Bussystem, dennoch böte der Ein-Leiter-Bus einen Vorteil der geringen physischen Kopplung zwischen den Modulen.

Für die Auswahl eines optimalen Bussystems sind entscheidend die Anzahl der notwendigen Leiter sowie die Übertragungsgeschwindigkeit. Die Größen der häufig verwendete Feldbussysteme wie den CAN-Bus, den I²C-Bus und den Profibus vergleichend mit dem MOLECUBE-internen Bus in Tab. 13 dargestellt.

Hier ist zu erkennen, dass die theoretisch möglichen Übertragungsgeschwindigkeiten von CAN-Bus, I²C-Bus und dem MOLECUBE-internen mit 1 Mbit·s⁻¹ gleich sind. Deutlich schneller ist der Profibus. Das MOLECUBE-interne Bussystem hat den entscheidenden Vorteil, dass es nur eine Signalleitung für eine bidirektionale Kommunikation benötigt. Auch ist hier eine Arbitrierung über das Token-Verfahren angewendet.

Ob eine Datenrate von 1 Mbit·s⁻¹ ausreichend für die Kommunikation zwischen den Modulen ist, soll anhand einer Modellrechnung überprüft werden. Es soll angenommen werden, dass pro Modul pro Rechenzyklus drei Sollwerte und drei Ist-Werte übertragen werden sollen. Jedes Datenpaket besteht aus einem Byte Adressdaten, einem Byte Befehlsdaten und zwei Byte Parameterdaten. Das ergäbe pro Modul eine Datenmenge von 24 *Byte* pro Rechenzyklus. Mit der Annahme der Anzahl von acht Modulen wäre die Datenmenge 192 *Byte*. Mit einer Datenrate von 1 *Mbit·s⁻¹* ergäbe sich eine Dauer des Übertragungsintervalls für alle acht Module von ungefähr 1,5 *ms*. Für die interne Kommunikation ist dies ausreichend schnell.

Tab. 13 – Überblick über relevante Parameter verbreiteter Feldbussysteme

Bus	notwendige Leiter (ohne GND)	maximale Übertragungsgeschwindigkeit in Mbit·s ⁻¹	maximale Leiterlänge	Hierarchisierung
MOLECUBE-intern (UART-basiert)	1	1	10 m	Multi-Master
CAN high Speed	2	1	40 m (bei 1 Mbit·s ⁻¹)	Multi-Master Master-Slave
I ² C	2	1	2 m bis 9 m	Master-Slave
Profibus	2	<12	>100 m	Master-Slave

6.5 Zusammenfassung der Schnittstellenanforderungen

Die Ergebnisse bzw. Festlegungen bezüglich der mechanischen Kopplung sind:

- die Module verfügen über mindestens eine Koppelstelle bestehend aus vier Gewindebohrungen M3x6
- Koppellemente dienen der Verbindung der Module
- drei Leiter (Masse-, Versorgungsspannungs- und Signalleiter) sind zwischen den elektrisch aktiven Modulen notwendig

Ergebnisse bzw. Festlegungen betreffend die elektrische Kopplung sind:

- Versorgungsspannung liegt bei $6 V < U_S < 24 V$
- der maximale Strom liegt bei $I_S = 10 A$
- Pegel: $U_{Logik} = 3,3 V$
- die Umsetzung erfolgt in Form einer „Daisy-Chain“- Verschaltung
- drei Leiter (Masse-, Versorgungsspannungs- und Datenleiter) sind zwischen den elektrisch aktiven Modulen notwendig

Ergebnisse bzw. Festlegungen bezüglich der informationstechnischen Kopplung sind:

- Die Datenrate beträgt $1 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$,
- verwendet wird ein Ein-Leiter-Bussystem für die Datenübertragung
- die Regelung der Antriebe erfolgt modulintern (dezentrale Steuerung),
- Soll- und Ist-Größen werden über die Kommunikationsschnittstelle ausgetauscht,
- Protokoll: zum Einsatz kommt eine Multi-Master-Struktur,
- die Arbitrierung erfolgt dezentral per Token-Verfahren.

KAPITEL 7

Einheitliche Modulkomponenten

"Technik ist immer fortschrittlich, das ist ihr eingeboren, sie hat zu entwerten, was war."

Theodor Heuss

7.1 Mechanische Modulkomponenten

7.1.1 Modulrahmen

Als einheitliche Modulkomponente ist die mechanische Schnittstelle definiert, welche über vier Gewindebohrungen verfügt. Eine mögliche Grundform der Module ist ein Würfel mit der Kantenlänge $l_M = 56 \text{ mm}$. Die Abweichung zur Forderung von 50 mm begründet sich in der Verwendung des kommerziell verfügbaren Aktors. Auf die Darstellung der konstruktiven Iterationsschleife wird an dieser Stelle verzichtet.

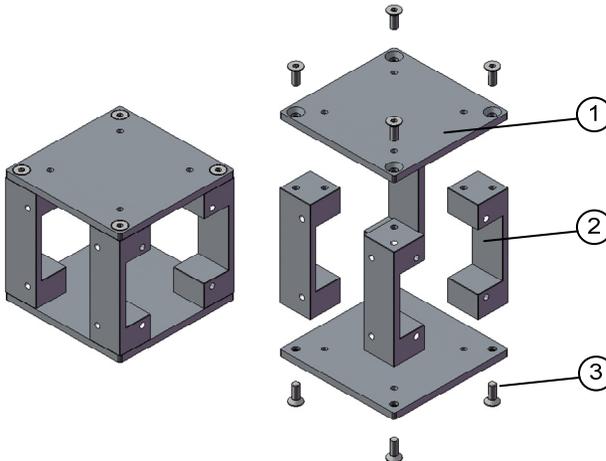


Abb. 46 – Der einheitliche Modulrahmen. Der Würfel ist eine der Formen, welche für Module ausgewählt werden können. Unter dem Fokus geringen Fertigungsaufwands wird der Modulrahmen aus zwei unterschiedlichen Bauteilen zusammengesetzt: Platte (1) und Streben (2). Die Komponenten werden mit Hilfe von Schrauben (3) fixiert.

Unter dem Aspekt des geringen Fertigungsaufwands wird der Modulrahmen aus nur zwei unterschiedlichen Teilkomponenten zusammengesetzt (siehe Abb. 46). Zwei identische Platten (1) sind mit säulenartigen Streben (2) mittels einer Schraubenverbindung (3) verbunden. Der so entstehende Rahmen verfügt auf jeder der sechs Seiten über die als Anforderung definierte mechanische Schnittstelle. Dieser als Halbzeug zur Verfügung stehende Modulrahmen kann für die Entwicklung funktioneller Module genutzt werden und stellt somit eine anwendungs-parametrisierbare Modulkomponente mit einheitlicher Schnittstelle dar.

Die Modulrahmen werden mittels Koppellementen verbunden. Dabei gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Größen und Formen, wie diese Verbindner ausgeführt werden können: Es gibt einerseits die Möglichkeit, zwei Modulrahmen direkt zu koppeln. Der Kraftfluss erfolgt sowohl durch das Koppellement als auch direkt von einem Modulrahmen auf den anderen. Das Koppellement muss eine geringe Last aufnehmen und kann entsprechend kleiner dimensioniert werden, beispielsweise werden nicht alle Bohrungen der Schnittstelle genutzt (vgl. Abb. 47 links).

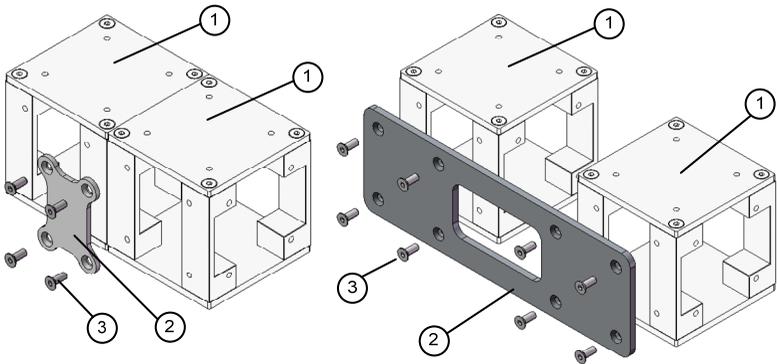


Abb. 47 – Mechanische Koppellemente. Links: Koppellement (2) für eine direkte Kopplung zweier Modulrahmen (1) mittels Schraubenverbindung (3), rechts: Erzeugen einer Distanz zwischen zwei Modulrahmen (1) durch ein Koppellement (2).

Soll andererseits ein Abstand zwischen zwei Modulrahmen erzeugt werden, muss das Koppellement die gesamte Belastung aufnehmen; entsprechend muss das Element dimensioniert sein. Bei der Befestigung werden alle Bohrungen der Schnittstelle genutzt (vgl. Abb. 47 rechts). Es stehen Koppellemente unterschiedlicher Länge zur Verfügung.

7.2 Elektronische Modulkomponenten

7.2.1 Modulinterne Elektronik

Die elektronischen Komponenten setzen sich aus den energieübertragenden und den informationsübertragenden Komponenten zusammen. Es existieren Komponenten, welche modulübergreifend einheitlich ausgeführt werden können. Dazu zählen die Programmier-, die Informationsbus- und die Energieschnittstelle, sowie die modulinterne Datenverarbeitung (siehe Abb. 48). Diese werden zu einer Basisplatine zusammengefasst.

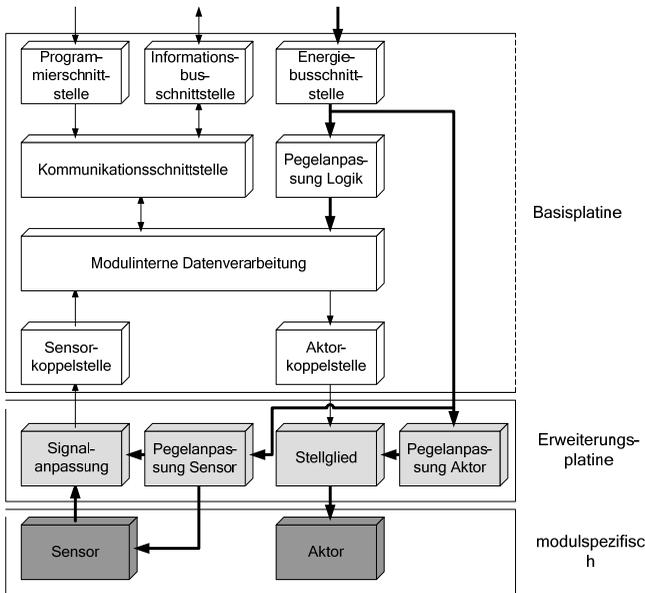


Abb. 48 – Darstellung elektronischen Komponenten. Betrachtet sind sowohl die informationsübertragenden und die energieleitenden Komponenten. Die modul-übergreifend einheitlichen Komponenten werden auf einer einheitlichen Basisplatine zusammengefasst. Die anwendungsparametrisierten Komponenten werden auf einer Erweiterungsplatine zusammengefasst

Um die Kopplung unterschiedlicher anwendungsspezifischer Aktoren und Sensoren zu ermöglichen, sind anwendungsparametrisierbare Komponenten mit Anpassungs- und Stellfunktion notwendig. Diese werden auf einer Erweiterungsplatine zusammengefasst.

Aus ökonomischer Sicht bietet dies den Vorteil, dass die Basisplatine in hoher Stückzahl und somit billiger gefertigt werden kann. Auch kann diese bei Defekt einfach ausgetauscht werden. Speziell angefertigt werden muss für die jeweilige Anwendung die Erweiterungsplatine. Allerdings ist das Standardisierungsniveau bei den Sensor- und Aktorkoppelstellen hoch; es kann hier auf Bauteile zurückgegriffen werden, welche anhand leistungsspezifischer Parameter gewählt werden können.

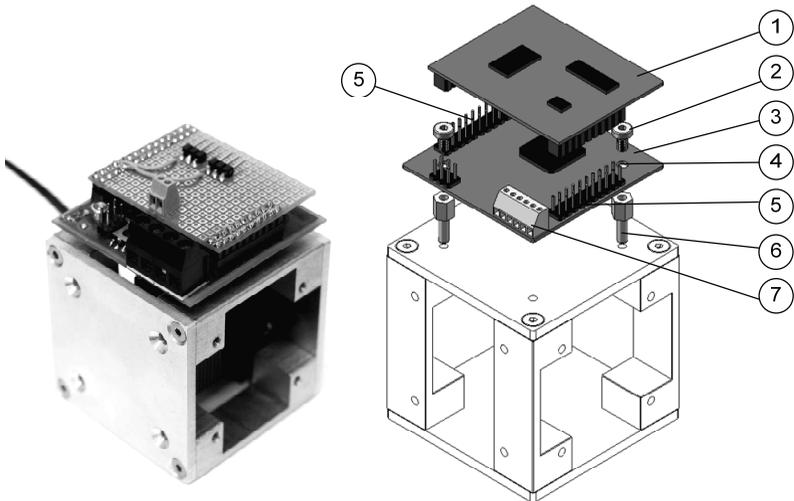


Abb. 49 – Ausführungsform der Platinen. Links: Zusammenbau der Modulelektronik bestehend aus einer Basis- (3) und einer Erweiterungsplatine (1), rechts: Explosionsdarstellung mit den Abstandshaltern (6) und den Schrauben (2). Die Erweiterungsplatine wird mittels so genannter Pfostenverbinder (5) aufgesteckt. Der Anschluss an Energie- und Informationsbus erfolgt über Klemmverbinder (7).

Der informationsverarbeitende Baustein der Basisplatine ist der Mikrocontroller Xmega128A1 der Fa. ATMEL. Dessen Versorgungsspannung liegt bei 3,3 V, welche mit Hilfe des Festspannungsreglers LT1129-3.3 zur Verfügung gestellt wird. Die Kopplung an den Feldbus erfolgt über die UART-Schnittstelle des Mikrocontrollers. Als Programmierschnittstellen stehen das „Program and Debug Interface“ (PDI) und eine JTAG-Schnittstelle zur Verfügung.

Das Platinenkonzept ist in Abb. 49 dargestellt. Zur mechanischen Kopplung der Basisplatine (3) an den Modulrahmen verfügt die Basisplatine über zwei

Durchgangsbohrungen (4) mit einem Durchmesser von 3,2 mm. Diese sind so angeordnet, dass die Platine mittels Abstandhaltern (6) und Schrauben (2) befestigt werden kann. Dies bietet die Möglichkeit, dass die Platine in verschiedenen Positionen und Orientierungen angeordnet werden kann.

Die Anschlüsse für den Energie- und Informationsbus (7) sind als Klemmverbinder ausgeführt. Für die Ankopplung der Erweiterungsplatine (1) sind die Ein- und Ausgänge des Mikrocontrollers auf Pfostenleisten geführt. Es stehen Analog-Digital- sowie Digital-Analog-Umsetzer und digitale Ein- und Ausgänge zur Verfügung. Zu den speziellen Funktionen bei den Eingängen gehören beispielsweise „Analog-Comparatoren“, „Timer“, „Counter“ und „Quadratur Encoder“. Bei den Ausgängen zählen PWM-Ausgänge zu den Schnittstellen mit definierter Funktion. Zur Kommunikation mit integrierten Schaltkreisen können beispielsweise Standards wie UART und SPI verwendet werden. Die Versorgungsspannung sowie die Masseleitung sind direkt auf zwei Kontaktstifte der Pfostenleiste geleitet und stehen für die Energieversorgung der Aktorik und der Sensorik zur Verfügung.

7.2.2 Kommunikationselektronik

Für eine erste Realisierung des modularen Kletterrobotersystems wird die Steuerungssoftware auf einem PC erstellt. Die Übertragung der Steuersignale zum Robotersystem erfolgt kabellos. Dafür bietet sich eine Funkverbindung an. Kommerziell ist eine Reihe von Systemen verfügbar, welche Funkschnittstellen bereitstellen.

Ein offener Funkstandard ist ZIGBEE. Es sind Funkverbindungen mit einer Entfernung bis zu 100 m möglich. Für die Kommunikation wird das Funksystem XBEE PRO ausgewählt. Das Funkmodul hat Abmessungen von 25 mm x 28 mm x 2 mm. Das Frequenzband liegt bei 2,4 GHz und das System verfügt über eine UART- Schnittstelle.

Das Feldbussystem ist hierarchiefrei ausgeführt, die Koordination des Datenaustauschs erfolgt nach dem Tokenprinzip. Die Überwachung des fehlerfreien Ablaufs wird einem Controller übertragen. Als Mikrocontroller für die Kommunikationsplatine wird der AVR32 der Fa. ATMEL ausgewählt. Dieser 32bit-Prozessor bietet mehr Möglichkeiten als der XMEGA128. Dies ermöglicht eine Übertragung von Steuerungsaufgaben vom Rechner auf das Kommunikationsmodul.

Die Peripherie entspricht weitgehend der auf den Modulplatten verwendeten. Zusätzlich wird ein Bauelement XBEE PRO für die Funkübertragung über eine

UART-Schnittstelle an den Mikrocontroller gekoppelt. Des Weiteren steht eine USB-Schnittstelle für die Programmierung zur Verfügung. Zur Nutzung dieser ist eine USB-UART-Brücke CP2102 der Fa. SILABS integriert.

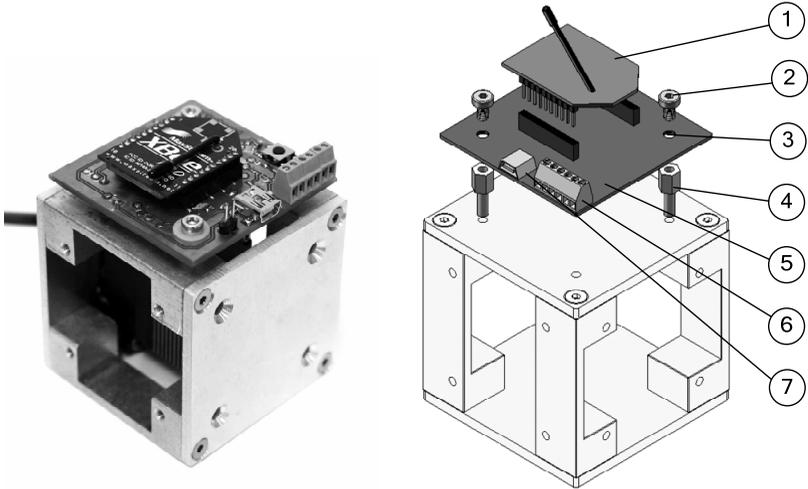


Abb. 50 – Kommunikationsplatine mit Funkeinheit. Links: Zusammenbau darstellung, rechts: Explosionsdarstellung. Am Modulrahmen wird die Kommunikationsplatine (5) über eine Schraubverbindung (2, 3) und Abstandshalter (4) angebracht. Die elektrische Schnittstelle (6) ist analog zur Modulplatine ausgeführt. Die Programmierung erfolgt über eine Schnittstelle (7).

Die Kommunikationsplatine wird ähnlich der Modulbasisplatine ausgeführt. Die Koppelstelle zur Erweiterungsplatine entfällt. Der prinzipielle Aufbau ist Abb. 50 dargestellt. Mechanisch wird die Kommunikationsplatine (5) analog der Modulplatine an einen Modulrahmen gekoppelt. Dazu sind die Durchgangsbohrungen (3) entsprechend der Anforderung vorgesehen; auch hier werden Abstandshalter (4) und Schrauben (5) verwendet. Zusätzlich ist das Funksystem XBEE PRO (1) integriert. Die Schnittstellen zu Energie- und Informationsbus (6) sind analog zur Modulplatine ausgeführt. Eine zusätzliche Programmierschnittstelle steht zur Verfügung. Ein standardisierter Steckverbinder (7) ist in die Platine integriert.

KAPITEL 8

Modulentwicklungen

„Ich könnte mir ein künftiges Jahrtausend denken, das unser Zeitalter der Technik anstaunte, wie wir die Antike bewundern, und Maschinen ausgrübe wie wir Statuen.“

Christian Morgenstern

8.1 Einheitliche Anforderungen

Im folgenden Kapitel werden jene Entwicklungen vorgestellt, die auf Grundlage der Anforderungen an die Schnittstelle aus der Kletterrobotik und aus der modularen Robotik realisiert wurden. Die Anforderungen an die Schnittstelle sind Festforderungen für die Modulentwicklung. Sie müssen erfüllt werden, damit Module kompatibel zum modularen System sind. Darüber hinaus gibt es noch spezifische Forderungen für die Module, welche sich hauptsächlich aus der Funktion für den Einsatz als Kletterroboter definieren.

Die entwickelten einheitlichen Modulkomponenten sollen verwendet werden, um den Entwicklungsaufwand für einzelne Module gering zu halten. Die Schnittstelle wird bei Verwendung der einheitlichen Modulkomponenten automatisch in das Modul integriert, die Kompatibilität zum modularen System ist somit gegeben. Die Elektronik für jedes Modul besteht aus der Basisplatine und der dazu gehörigen Erweiterungsplatine. Die Erweiterungsplatine dient dazu, die modul-spezifischen Aktoren und Sensoren an die einheitliche elektronische und informationstechnische Schnittstelle zu koppeln.

Die Entwicklung dieser Platine gehört somit zu jeder Entwicklung eines Moduls dazu. Funktionell teilen sich die Module in Bewegungs-, Greif- und Energieversorgungsmodule auf. Im Folgenden werden die aktuell vorhandenen Module vorgestellt. Auf die Darstellung des Entwicklungsprozesses wird verzichtet und gegebenenfalls auf die entsprechenden Arbeiten verwiesen. Auf weitere dazu in Beziehung stehende Literatur wird an den Stellen verwiesen. Die Anforderungen für die Entwicklung spezieller Module ist in Tab. 14 gelistet.

Tab. 14 – Forderungsliste für die Entwicklung von Modulen

	Nr.	Wtg.	Anforderung	Wert	Bemerkung
Mechanik	Funktion				
	1	M	Übertragbares Moment der Schnittstelle M_S	6,0 Nm	
	2	M	Übertragbare Kraft der Schnittstelle F_S	30,0 N	
	3	M	Übertragbares Greifmoment M_G	6,0 Nm	nur Greifmodul
	4	M	Übertragbare Greifkraft F_G	30,0 N	nur Greifmodul
	5	M	Antriebsmoment M_A	2,6 Nm	nur Bewegungsmodul
	6	W	Modulmasse m_M	<0,25 kg	
	Gestalt				
	7	W	Verwendung des einheitlichen Modulrahmens		
8	F	Implementierung der mechanischen Schnittstelle		vgl. Abb. 39	
9	F	Entwicklung aktorspezifischer Adapter			
Elektrotechnik	Funktion				
	10	F	Übertragbarer Strom I_S	10 A	Dauerbelastung
	11	F	Versorgungsspannung U_V	6..24 V	anwendungsspezifische Festlegung
	12	F	Verwendung der einheitlichen Modulplatine		
	Gestalt				
	13	W	Verwendung der Layoutvorlage für die Erweiterungsplatine		
	14	F	Verkoppelung der Module per Daisy-Chain-Prinzip		
15	F	Verwendung hochflexibler Leiter zur intermodularen Koppelung			
Informationsverarbeitung	Funktion				
	16	F	Multi-Master-System		
	17	F	Dezentrale Arbitrierung		
	18	F	max. Datenrate	1 Mbit/s ¹	
	19	W	Regelkreis auf Modulelektronik umsetzen		Lokale Intelligenz
20	F	Übertragung von Soll- und Ist-Zuständen der Module			

8.2 Bewegungsmodule

8.2.1 Rotationsmodul

Für die Erzeugung einer Rotationsbewegung wurde ein Bewegungsmodul mit dem rotatorischen Freiheitsrad $f = 1$ entwickelt (vgl. Abb. 51). Als mechanische Basis für das Modul wurde der einheitliche Modulrahmen gewählt. Mit Hilfe von Halteelementen (1, 2, 4) wird ein Servomotor (3) der Fa. HITEC befestigt. Bei dem Servoantrieb HSR-5980SG handelt es sich um einen positionsgeregelten elektromechanischen Wandler. Er erzeugt ein maximales Drehmoment von 3 Nm (Herstellerangabe). Die Winkelgeschwindigkeit liegt bei maximal $7,5\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (Herstellerangabe). Die Ansteuerung erfolgt über ein pulswidenmoduliertes Signal mit TTL-Pegel. Die Versorgungsspannung liegt bei $7,4\text{ V}$.

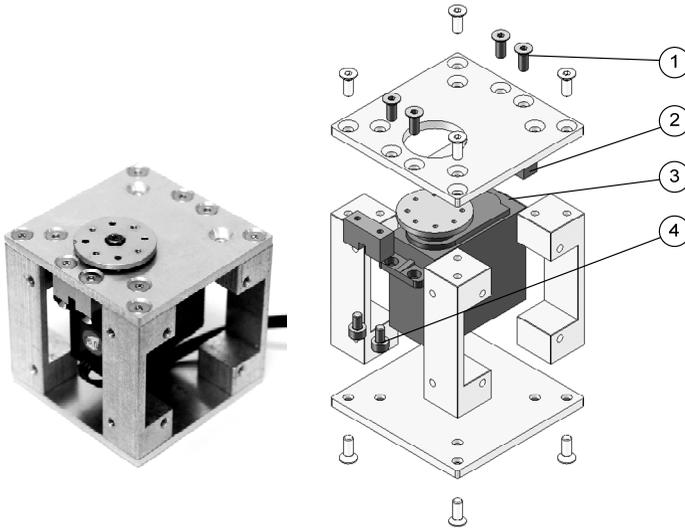


Abb. 51 – Rotationsmodul. Links: Zusammenbau darstellung, rechts: Explosionsdarstellung. In den modifizierten Modul-rahmen ist ein Antrieb (3) mittels Halteelementen (1, 2, 4) integriert.

Die Funktion der Erweiterungsplatine besteht für den Fall der Verwendung des ausgewählten Aktors darin, ein stromproportionales Messsignal bereitzustellen und die für den Aktor notwendigen Steckverbinder zu beschalten und zu befestigen.

8.2.2 Doppelrotationsmodul

Das Doppelrotationsmodul mit dem Freiheitsgrad $f = 2$ ist als Weiterentwicklung des Moduls mit dem Freiheitsgrad $f = 1$ zu sehen (vgl. Abb. 52). Ebenfalls wurde der Modulrahmen als Basis gewählt und angepasst, so dass zwei der Aktoren (3, 6) mit Hilfe von Befestigungselementen (1, 2, 4, 5) integriert werden konnten. Diese sind so angeordnet, dass die Achsen im Winkel von 90° stehen. Die Achsen verlaufen mit einem Abstand von 20 mm zueinander. Dieser Nachteil, speziell für die kinematische Berechnung, ließ sich aufgrund des geringen Bauraums bei Verwendung der Servoantriebe nicht vermeiden.

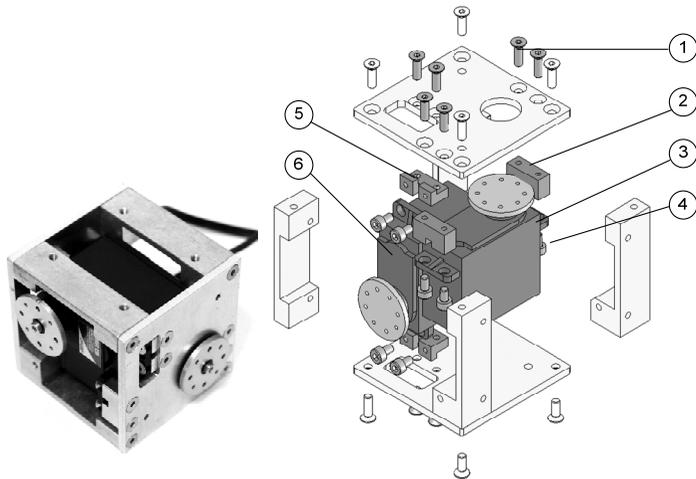


Abb. 52 – Doppelrotationsmodul. Links: Zusammenbauansicht, rechts: Explosionsdarstellung. In einem modifizierten Modulrahmen sind zwei Antriebe (3, 6) integriert. Dafür sind Halterungen (2, 5) notwendig, mit denen Antrieb und Rahmen verschraubt werden.

Die Erweiterungsplatine ist analog der Erweiterungsplatine für das Rotationsmodul aufgebaut. Hier müssen zwei Strommessungen realisiert und zwei Koppelstellen für die Steckverbinder zur Verfügung gestellt werden.

8.2.3 Mechanische Abtriebsadapter

Der Aktor HSR-5980SG verfügt abtriebsseitig über eine mechanische Schnittstelle, die nicht kompatibel ist zu der für das modulare System als einheitlich definierten Schnittstelle. Entsprechend der in Abb. 37 dargestellten Struktur sind Adapter notwendig, um die Kompatibilität herzustellen.

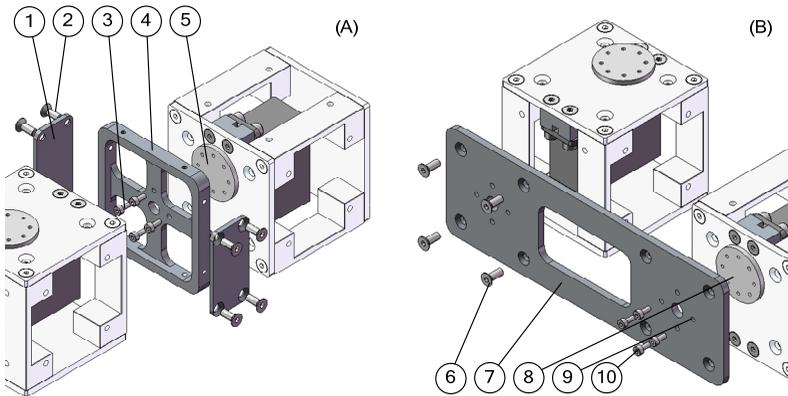


Abb. 53 – Varianten realisierter aktorspezifischer Adapter. (A) Ein spezieller Adapter zur mechanischen Kopplung in axialer Richtung. Ein Adapter (4) ist mit dem Modulabtrieb (5) verschraubt (3). Mit Hilfe eines Verbinders (2) wird der Adapter über Schrauben (2) mit einem weiteren Modul verbunden. (B) – eine Ausführungsform der Adapter in radialer Richtung. Hierfür sind in einheitliche Verbinders (7) passende Abtriebskoppelstellen (9) integriert. So kann der Verbinder mit dem Abtrieb und dem Modulrahmen verschraubt (6, 10) werden.

Der Fertigungsaufwand, die Anzahl der Teile und die Masse des Gesamtsystems sollen so gering wie möglich gehalten werden. Eine Möglichkeit ist die Entwicklung spezieller Adapter zur Kopplung. In Abb. 53A ist eine umgesetzte Variante dargestellt. Ein Adapter (4) ist über die abtriebsseitige Koppelstelle des Aktors (5) mittels Schrauben (3) verbunden. Dieser Adapter kann über einen weiteren Verbinder (1) mit einem weiteren Modul verschraubt (2) werden.

Unter dem Aspekt der Reduktion der Anzahl verwendeter Teile ist eine weitere Ausführungsform wie in Abb. 53B dargestellt realisiert. Die Koppelstelle (9) zum Abtrieb (8) ist in ein vorhandenes Koppellement (7) integriert, demzufolge ist kein zusätzliches Bauteil notwendig. Dieses Koppellement kann nun sowohl mit der mechanischen Schnittstelle (6) als auch mit dem Abtrieb (10) des modularen Systems verschraubt werden.

8.3 Greifmodule

8.3.1 Fingergreifer

Die Entwicklung eines Fingergreifers für das modulare System ist in [Koch 2010] dokumentiert. Die in den Anforderungen definierte Last für den Greifer von 30 N bzw. 6 Nm kann übertragen werden. Nachgewiesen werden konnte

die Funktionsfähigkeit auf zylinderförmigen starren Substraten mit einem Durchmesser von $20\text{ mm} < d_{\text{sub}} < 50\text{ mm}$. Die getesteten Materialien sind Holz mit glatter Oberfläche sowie Aluminium.

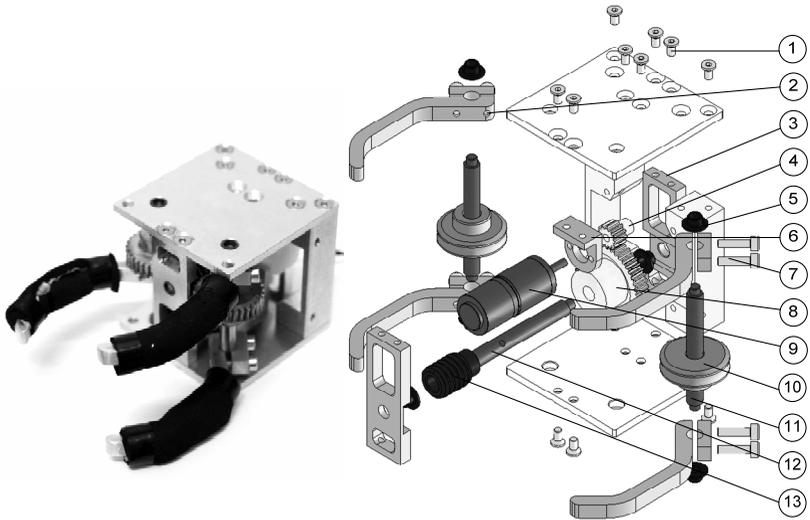


Abb. 54 – Aufbau des Finger-Greifers. Links: Zusammenbau darstellung mit Greiffingern (2), Greiferwelle (11), Schneckengetriebe (10, 13), Zwischenwelle (12), Zahnradgetriebe (4, 8) und Antrieb (9) mit Halterung (6). Zur Lagerung werden Gleitlagerbuchsen (5) in speziellen Lagerblöcken (3) verwendet. Schraubverbindungen (1, 7) dienen der einfachen Demontage und Montage.

Als Basis wurde der einheitliche Modulrahmen gewählt, und so die einheitliche mechanische Schnittstelle zur Verfügung gestellt. Allerdings wurden Änderungen in höherem Umfang als bei den Bewegungsmodulen durchgeführt, um die funktionsrelevanten mechanischen Komponenten integrieren zu können. Der Aufbau ist in Abb. 54 dargestellt.

Als Aktor wurde ein Gleichstrommotor (9) der Fa. MAXON MOTOR GMBH gewählt, der über einen Adapter (6) auf dem Modulrahmen befestigt ist. Über ein mehrstufiges Getriebe mit einer selbstsperrenden Stufe wird eine hohe Übersetzung erzielt. Die Selbstsperrung hat den Vorteil, dass ein leistungsloses Halten möglich ist, wenn die Greifbacken zugestellt sind. Bei Belastung tritt eine Selbstverstärkung der Greifkräfte und -momente auf. Die Getriebestufen setzen sich zusammen aus einem am Motor befestigten Planetengetriebe (9),

einem Stirnradgetriebe (4), (8) und einem Schneckengetriebe (10), (13). Mittels zwei Schneckenräder wird die Bewegung synchron auf die beiden auf einer Welle (11) befestigten Greifer (2) übertragen.

Die Lagerung der notwendigen Wellen erfolgt mittels Gleitlagern (5). Die Finger der Greifer sind auf der Welle mittels einer Schraubklemmverbindung (7) fixiert. Der Aufbau erfordert verbindende Elemente (3) zwischen den beiden Platten des Modulrahmens, welche zusätzlich die Aufgabe der Lagerung der mittleren Welle (12) übernehmen. Die Last wird mit Hilfe einer Schraubverbindung (1) auf den Rahmen übertragen.

Als Sensorinformation wird momentan ausschließlich der Strom des Motors gemessen. Aus diesem kann auf das Antriebsmoment und somit auf die Greifkraft geschlossen werden. Somit muss die Erweiterungsplatine die Messung des Motorstroms ermöglichen. Des Weiteren muss ein Stellglied in Form einer Endstufe für den Motor A2516 bereitgestellt werden. Der maximale Strom beträgt ca. $0,5\text{ A}$, so ist beispielsweise eine auf dem IC L293D basierende Endstufe geeignet.

8.3.2 Unterdruckgreifer

Der Unterdruckgreifer wurde für ebene Glasflächen entwickelt. Der Entwicklungs-, Konstruktions- und Herstellungsprozess ist dargestellt in [Funda 2009]. Die Funktion wurde nachgewiesen auf einer ebenen Glasfläche, die Forderung nach einer zu übertragenden Greiflast von 30 N bzw. 6 Nm ist erfüllt.

Hier wurde ebenfalls als Basis der Modulrahmen verwendet, nur wenige Anpassarbeiten waren notwendig. Das Greifprinzip ruht auf der Volumenverschiebung von Luft. Der dafür notwendige elektromechanische Wandler ist eine unterdruckerzeugende Membranpumpe (7) des Typs FM1101LC der Fa. FÜR GUTH. Der maximale Absolutwert des Unterdrucks liegt bei ca. $0,34\text{ bar}$. Mit Hilfe eines 3/2-Wegeventils (1) wird der Luftstrom geschaltet. Verwendet werden vier Saugnapfe der Fa. FIPA (9) mit einem Durchmesser von 40 mm , welche auf speziellen Sperrventilen (8) mit Stößel (10) sitzen.

Diese Sperrventile verschließen das Schlauchsystem, wenn der Saugnapf nicht in Kontakt mit einer Fläche ist. Die Position des Stößels wird mit Hilfe eines Sensorsystems bestimmt, welches auf einem Reed-Schalter (11) und einem integrierten Magneten basiert. Es wird mittels einer Triggerung zwischen „offen“ und „geschlossen“ bezogen auf das Sperrventil unterschieden. Befestigt werden die Tastventile am Modulrahmen mittels eines Befestigungswinkels (3)

und einer Schraubverbindung (2). Der Unterdruck im Schlauchsystem wird mit einem Relativdrucksensor (6) der Fa. SENSORTECHNICS gemessen. Dieser ist auf einer am Modulrahmen verschraubten (4) Adapterplatine (5) befestigt.

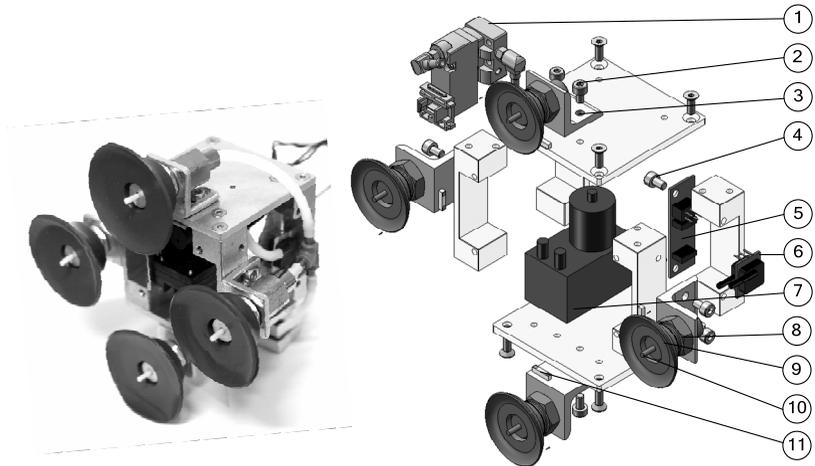


Abb. 55 – Unterdruckgreifer. Links: Zusammenbau darstellung, rechts: Explosionsdarstellung. Als Basis dient der einheitliche Modulrahmen. Die wichtigen funktionellen Komponenten sind vier Saugnapfe (9) auf Sperrventilen (8), ein Schaltventil (1), ein Drucksensor (6) und eine unterdruckerzeugende Pumpe (7). Befestigungselemente (2, 3) sind notwendig für die Saugnapfe. Der Drucksensor ist auf einer Platine (5) befestigt, welche mit dem Rahmen verschraubt (4) wird. Die Stellung der mit Magneten versehenen Stößel (10) wird mit einem Reedschalter (11) detektiert.

Die Erweiterungsplatine muss durch die höhere Anzahl an Sensoren und Aktoren mehr Funktionen als die Platinen der Aktormodule erfüllen. Aktoren sind das 3/2-Wege-Ventil und die Unterdruckpumpe. Beide benötigen bei einer Spannung von 6 V weniger als 0,5 A Strom, so kann auch hier der IC L293 als Stellglied verwendet werden. Der Drucksensor benötigt eine Spannungsversorgung von 5 V, als Messsignal liefert er ein druckproportionales Spannungssignal. Des Weiteren ist die Beschaltung der Reedschalter realisiert.

8.3.3 Magnetgreifmodul

Für das Greifen auf ebenen ferromagnetischen Oberflächen ist das Magnetgreifmodul entwickelt worden [Obermaier 2009]. Die Funktion wurde nachgewiesen auf einer 5 mm starken Platte aus weichmagnetischem Material (Stahl St50).

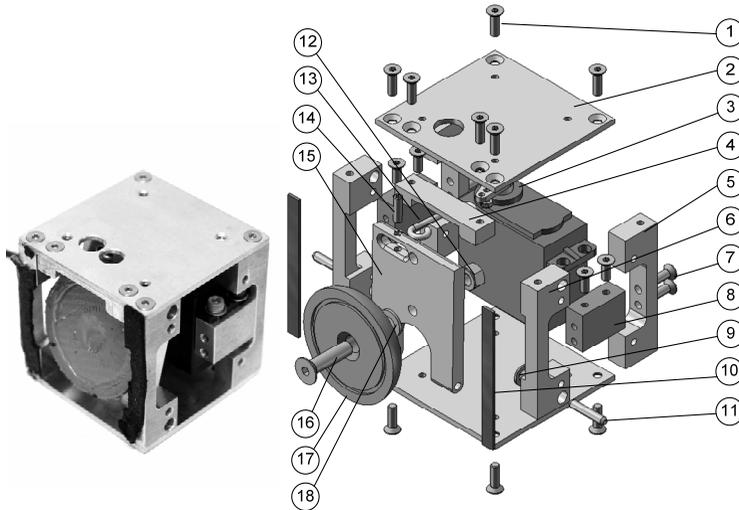


Abb. 56 – Magnetgreifmodul. Links: Zusammenbau darstellung, rechts: Explosionsdarstellung. Der Modulrahmen besteht aus anwendungsspezifischen Komponenten (1, 2, 5, 6). Wichtige funktionelle Komponenten sind der Permanentmagnet (17) mit Befestigungselementen (12, 16, 18), der Antrieb (3) mit Befestigungselementen (7, 8) und die Klappe (15) mit Lagerung (9, 11) und Anschlag (4). Über ein die Klappe bewegendes Gestänge (13, 14) kann der Luftspalt und somit die Greifkraft eingestellt werden. Zur Reibungserhöhung sind Elemente aus Polymerschaum (10) angebracht.

Bei diesem Modul wurde nicht der einheitliche Modulrahmen verwendet, die notwendige mechanische Schnittstelle ist in die Rahmen-elemente (2), (5) und (6) integriert und die Abmessungen entsprechen den Anforderungen an die Schnittstelle.

Als magnetfelderzeugendes Element ist ein Permanentmagnet gewählt, um ein leistungsloses Halten zu ermöglichen. Der Permanentmagnet ist als Topfmagnet (1) ausgeführt. Als Eisenrückschluss dient das Substrat.

Die Magnetkraft F_m ist proportional zu δ^2 , wobei δ die Länge des Luftspaltes ist. Zur Veränderung der Magnetkraft wird der Luftspalt verändert. Dazu ist der Magnet auf einer Klappe (15) mit einer Schraubverbindung (12, 16) montiert. Eine Abstandsscheibe (18) dient als Feinjustagemöglichkeit für die Luftspaltlänge und somit für die maximale Greifkraft. Den Kraftschluss für die Greiflast schließt ein mechanischer Anschlag (4). Auf dem Modulrahmen sind zur Erhöhung der durch Haftreibung erzeugten Tangentialkräfte spezielle

Strukturen (10) angebracht, welche in [Mämpel et al. 2008] näher beschrieben sind.

Die Lagerung der Klappe erfolgt durch ein Gleitlager bestehend aus einem Stift als Achse (11) und einer Buchse (9). Bewegt wird die Klappe mittels eines Gestänges (13), das mit einer Stiftschraube (14) an der Klappe beweglich gelagert ist. Der Aktor HSR-5980SG (4) ist ebenfalls mit dem Gestänge verbunden und mit dem Modulrahmen über einen Adapter (8) verschraubt (7).

Da das Magnetgreifmodul noch über keine Sensorik verfügt, muss die Erweiterungsplatine analog zu den Bewegungsmodulen die Funktionen der Strommessung und Weiterleitung der Aktorsignale erfüllen.

8.4 Energiespeichermodul

Der elektrische Energiespeicher muss in seiner Kapazität und in der Spannung und dem Strom nach den in den Bewegungs- und Greifmodulen verwendeten Komponenten gewählt werden. Die maximale Betriebsspannung der vorgestellten Module liegt bei 7,4 V. Geeignet als Speicherelemente sind LiPo-Akkumulatoren mit einer Nennspannung von 7,4 V.

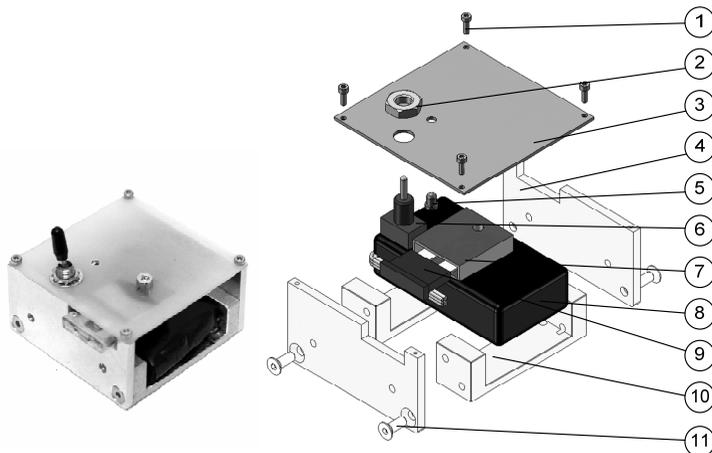


Abb. 57 – Energiespeichermodul. Der Energiespeicher ist ein Lithium-Polymer-Akkumulator mit einer Kapazität von 0,85 Ah, links: Zusammenbaudarstellung, rechts: Explosionsdarstellung. Das Energiespeichermodul basiert auf dem einheitlichen Modulrahmen (4, 10, 11). Als Abdeckung für den Akku (8) dient eine verschraubte Platte (1, 3). Ein Schalter (2, 6) dient der Unterbrechung der Energieversorgung. Eine LED (5) zeigt den Status an. Eine Flachsicherung dient dem Schutz des Systems bei Kurzschluss (7, 9).

Der Aufbau des Energiemoduls ist in Abb. 57 dargestellt. Gewählt wird ein LiPo-Akkumulator “7621.2“ (8) der Fa. GRAUPNER. Dieser hat einen maximalen Entladestrom von $25,5 \text{ A}$ bei einer Nennspannung von $7,4 \text{ V}$. Die Ladungskapazität beträgt $0,85 \text{ Ah}$. Bei einem geschätzten durchschnittlichen Entladestrom von 5 A beträgt die Entladedauer etwa 10 min . Aufgrund des sehr hohen Kurzschlussstroms von mehr als 30 A (Herstellerangabe) ist eine Sicherung notwendig. Die Halterung (7) und die Flachsicherung (9) sind auf Ströme bis 30 A ausgelegt. Der Speicher kann vom Energiebus mit einem Schalter (6) getrennt werden, eine LED (5) zeigt den Status der Energieversorgung an. Über die Kabel mit Steckverbinder werden sowohl die Schnittstelle zum Energiebus als auch zum Ladegerät bereitgestellt (nicht abgebildet).

Der einheitliche Modulrahmen dient auch hier als Grundlage. Die Bauteile werden stark verändert, aber die einheitliche mechanische Schnittstelle ist beim Energiespeichermodul vorhanden. Es werden nur zwei Verbinder (10) verwendet, die Platte (4) wird verkleinert. Eine Abdeckplatte (3) dient einerseits als Befestigung des Schalters mittels einer Mutter (2) und der LED, andererseits als Schutz des LiPo-Akkumulators vor Beschädigung.

8.5 Ergebnisse und Diskussion der Modulentwicklung

8.5.1 Überblick der Module

Es wurden sechs unterschiedliche Modultypen bis zur Produktrealisation entwickelt. Die Eigenschaften der Funktionsmodule sind die in Tab. 15 gelistet. Dazu zählen das Energiespeichermodul, in der Gruppe der Bewegungsmodule das Rotationsmodul und das Doppelrotationsmodul und in der Gruppe der Greifmodule das Fingergreif-, das Magnetgreif- und das Unterdruckgreifmodul.

8.5.2 Diskussion: einheitliche Modulkomponenten

Der einheitliche Modulrahmen, welcher als Basis für die Entwicklung zur Verfügung steht, konnte bei beiden Bewegungsmodulen, bei zwei der drei Greifmodule sowie beim Energiemodul verwendet werden. Lediglich bei der Entwicklung des Magnetgreifmoduls wurde ein anwendungsspezifischer Rahmen verwendet. Ausschlaggebend hierfür waren Bauraumanforderungen. Vergleichend kann man sagen, dass durch die Verwendung des einheitlichen Modulrahmens Entwicklungs- und Fertigungsaufwand gesenkt werden können.

Die Festigkeit und die Steifigkeit des Modulrahmens sind sehr hoch. Das Material Aluminium wurde gegenüber einem Kunststoff aus Gründen der Fertigung und des E-Moduls bevorzugt. Unter dem Aspekt einer möglichen Gewichtsreduktion bei gleich bleibender Steifigkeit des Modulrahmens sollte der Einsatz von den Kunststoffen POM und PET diskutiert werden. Beide Werkstoffe können gut spanend bearbeitet werden, sind nicht sprödbrechend und besitzen eine Dichte, die etwa halb so groß ist wie die des Aluminiums.

Tab. 15 – Überblick über die Bewegungs- und Greifmodule.

RM – Rotationsmodul, FGM- Finger-Greifer-Module, MGM – Magnetgreifermodul, UGM - Unterdruck-Greifer-Modul, EM - Energiespeichermodul

	Parameter	Anforderung	EM	Bewegungsmodul		Greifmodul		
				RM	DRM	FGM	MGM	UGM
mechanisch	Masse in <i>kg</i> (mit Elektronik)	<0,25	0,12	0,22	0,27	0,31	0,29	0,36
	Antriebsmoment in <i>Nm</i>	2,6	-	3	3	-	-	-
	Greifkraft von 30 <i>N</i> nachgewiesen	30 <i>N</i>	-	-	-	ja	ja	ja
	Greifmoment von 6 <i>Nm</i> nachgewiesen	6 <i>Nm</i>	-	-	-	ja	ja	ja
elektrisch	minimale Versorgungsspannung in <i>V</i>	6..24	7,4	7,4	7,4	6,3	7,4	6,3
	maximale Stromaufnahme in <i>A</i>	< 2,0	-	1,5	3,0	0,6	1,5	1,0
	maximale Stromabgabe in <i>A</i>	10	25,5	-	-	-	-	-
informativ	Aktorsignale	PWM analog binär	-	1x PWM	2x PWM	1x PWM	1x PWM	1x PWM 1x binär
	Sensorsignale	analog binär	-	1x analog	2x analog	1x analog	1x analog	1x analog 4x binär
Modularisierung	Einheitlicher Modulrahmen verwendet	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja
	Einheitliche Elektronik verwendet	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja

Die entwickelten Modulplatinen bieten die Möglichkeit, über eine spezielle Erweiterungsplatine die Aktoren und Sensoren aller bisher entwickelten Funktionsmodule informationstechnisch einzubinden. Die Erweiterungsplatinen bieten ausreichend Raum für die Integration notwendiger Anpassungs- und Leistungselektronik mit Stellfunktion. In der Praxis zeichnet sich ab, dass eine Modulplatine für eine Gruppe aus zwei bis drei Modulen ausreichend ist. Die Rechengeschwindigkeit der verwendeten Mikrocontroller ist hinreichend hoch. Die Erweiterungsplatine muss jeweils an die Anwendung angepasst werden.

Der geringe Verkabelungsaufwand durch lediglich drei Leiter zwischen den einzelnen Modulen zeigt sich als vorteilhaft. Die Ausführung mit hochflexibler silikon-ummantelter Litze gestaltet sich gelenkübergreifend als hinreichend sicher und nachgiebig. Die Befestigung der Elektronik außen am Modul birgt Risiken, besonders im Fall des physischen Absturzes eines Systems. Diese Risiken könnten durch geeignete Einhausungen minimiert werden. Das Anbringen der Elektronik im Inneren der Module erforderte eine Vergrößerung des Modulrahmens im Verlaufe einer Neuentwicklung.

8.5.3 Diskussion: Bewegungsmodule

Die Bewegungsmodule besitzen die mechanischen Eigenschaften, welche in den Anforderungen gefordert wurden. Der Antrieb, welcher in Rotations- und in Doppelrotationsmodule integriert wurde, erfüllt die Forderung nach dem notwendigen Moment von $2,6 \text{ Nm}$. Die Antriebe zeichnen sich durch eine hohe Lebensdauer aus. Lediglich ein Antrieb musste während der umfangreichen Experimente ersetzt werden. Quantifiziert wurde die Lebensdauer nicht. Als ungünstig erweist sich die Befestigung der Antriebe, welche besonders bei hohen Momenten ein elastisches Verhalten aufweist. Auch die Positionierungsungenauigkeit der Antriebe bei einem hohen Lastmoment ist nachteilig. Des Weiteren neigen die Antriebe bei hoher Last zu einer starken Wärmeentwicklung.

Das Rotationsmodul liegt mit einer Masse von $0,22 \text{ kg}$ leicht unter der Forderung von $0,25 \text{ kg}$, das Doppelrotationsmodul mit $0,27 \text{ kg}$ leicht darüber. Die Versorgungsspannung des Moduls liegt bei $7,4 \text{ V}$, der maximale Strom bei 3 A . Damit ist der geforderte maximale Strom von 2 A überschritten. Dies muss bei der Verwendung des Moduls berücksichtigt werden, eine Verwendung ist dennoch möglich. Der einheitliche Modulrahmen konnte als Grundlage für die Entwicklung genutzt werden, die einheitliche Modulelektronik wird verwendet.

Aufgrund der Größe der Module konnte der Abtrieb der Module nicht in der Mitte des Moduls erfolgen, sondern um 10 mm nach außen versetzt. Dies hat zur Folge, dass die Drehachse nicht zentrisch ist. Die Lage der Achsen hat Auswirkungen auf kinematische Berechnungen. Ein ähnliches Problem tritt bei dem Doppelrotationsmodul auf. Die beiden Drehachsen schneiden sich nicht, sondern sind um 20 mm versetzt. Ideal wäre kein Versatz, um eine kardan-analoge Kinematik zu erreichen. Eine Berücksichtigung dieser Achsabstände in der kinematischen Berechnung ist möglich, bedingen aber höheren Berechnungsaufwand.

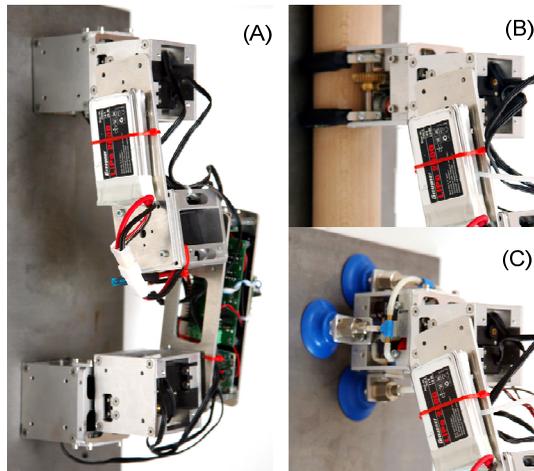


Abb. 58 – Integration unterschiedlicher Greifmodule in dieselbe Grundstruktur. (A) – Magnetmodul, (B) – Fingergreifermodul, (C) - Unterdruckmodul

8.5.4 Diskussion: Greifmodule

Die für das modulare System entwickelten Greifmodule erfüllen die Vielzahl der Anforderungen, welche am Anfang des konstruktiven Entwicklungsprozesses an sie gestellt wurden. Die Anforderungen durch das modulare System wurden erfüllt, eine Integration ist damit ohne Probleme möglich (vgl. Abb. 58). Die Masse der Greifmodule übersteigt die in den Anforderungen definierte Modulmasse von $0,25\text{ kg}$. Das leichteste Modul ist das Magnetgreifermodul mit $0,29\text{ kg}$, das schwerste das Unterdruckmodul mit $0,36\text{ kg}$.

Im Kap. 8.5.5 erfolgt eine Nachrechnung der Eigenschaften des integrierten Systems. Die geforderten Greiflasten werden bei allen drei Modulen erzeugt. Eine elektronische Einbindung der Module über Adapterplatinen ist möglich.

8.5.5 Validierung der Module anhand des Referenzsystems

Das Referenzsystem, wie es in Kap. 3.3.1 dargestellt ist, besteht aus zwei Greifern und einem Rumpf mit dem mechanischen Freiheitsgrad von $f = 6$. Dieser Rumpf kann aus drei Doppelrotationsmodulen oder sechs Rotationsmodulen aufgebaut werden (vgl. Abb. 59). Die Verwendung der Doppelrotationsmodule hat den Vorteil eines geringeren Gewichts und einer geringeren Gesamtlänge.

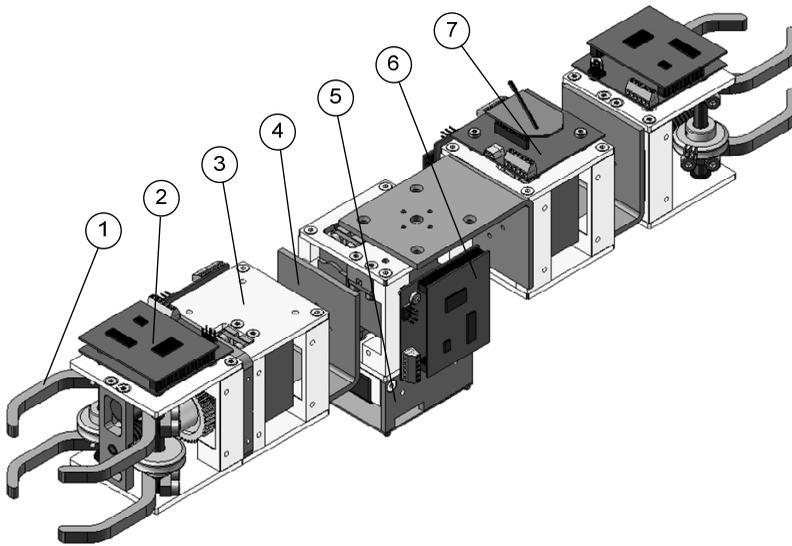


Abb. 59 – CAD-Darstellung des Referenzsystems. Das System ist aufgebaut aus drei Doppelrotationsmodulen (3) mit Elektronik (6), zwei Greifmodulen (1) mit Elektronik (2), der Kommunikationselektronik (7), einem Energiemodul (5) und mechanischen Koppellementen (4).

Zwei Greifer (1), hier dargestellt sind die Fingergreifer, sind gekoppelt durch drei Doppelrotationsmodule (3). Verbunden sind die Module durch winklige mechanische Koppellemente (4). Sowohl die Greiferelektronik (2), die Bewegungsmodulelektronik (6) und die Kommunikationselektronik sind berücksichtigt (7). Das Energiemodul (5) ist am mittleren Bewegungsmodul befestigt.

Die Aktoren erzeugen ein maximales Drehmoment von 3 Nm (Herstellerrangabe), welches auch in Tests bestätigt werden konnte [Obermaier 2009]. Für den statischen Fall stellt sich die Extremlage wie folgt dar: Ein Greifmodul ist am Substrat fixiert, das andere ist frei beweglich. Die gesamte Roboterstruktur wird horizontal positioniert. Die Aktoren müssen dabei das Haltemoment aufbringen.

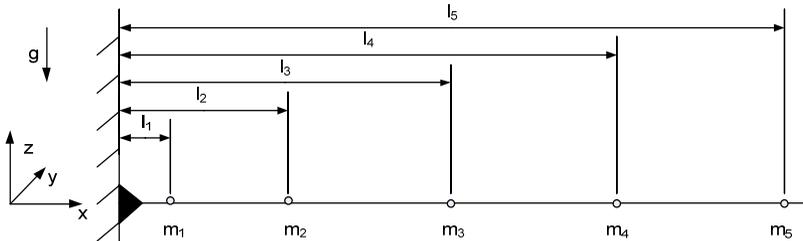


Abb. 60 – Abstrahiertes Modul des Referenzsystems

Das System soll nicht im Experiment überprüft werden, sondern lediglich für den statischen Fall berechnet werden. Die Massen für die Module sind der Tab. 15 entnommen, für die mechanischen Koppellemente werden $m_{mK} = 30$ g pro Modul zum Modulgewicht addiert. Der Schwerpunkt wird in das Zentrum der Module gelegt. Als Greifmodul des Referenzsystems wird der Unterdruckgreifer ausgewählt, da dieser die höchste Masse aller Greifmodule hat. Das Energiemodul ist am mittleren Doppelrotationsmodul befestigt. Damit ergeben sich mit

$$m_{UGM} = 0,36 \text{ kg}$$

$$m_{DRM} = 0,27 \text{ kg}$$

$$m_{EM} = 0,12 \text{ kg}$$

die Punktmassen m_1 bis m_5 im Modell pro Massenpunkt einer zusätzlichen Masse von

$$m_{mK} = 0,03 \text{ kg}$$

für elektrischen Leitungen, mechanische Koppellemente und Schrauben zu

$$m_1 = 0,39 \text{ kg}, m_2 = 0,30 \text{ kg}, m_3 = 0,42 \text{ kg}, m_4 = 0,30 \text{ kg}$$

$$\text{und } m_5 = 0,39 \text{ kg}.$$

Die Längen sind aus den Konstruktionsdaten abgeleitet und betragen

$$l_1 = 28 \text{ mm}, l_2 = 93 \text{ mm}, l_3 = 184 \text{ mm}, l_4 = 275 \text{ mm und } l_5 = 363 \text{ mm}.$$

Die statische Greifkraft berechnet sich zu

$$F_{Gz} = g \sum_{n=1}^5 m_n = 17,7 \text{ N} . \quad (11)$$

Die übertragende statische Kraft wurde mit 30 N angesetzt, da diese beim Referenzsystem $17,7 \text{ N}$ beträgt, ist diese Forderung als ausreichend anzusehen.

Das statische Greifmoment um die y-Achse berechnet sich zu

$$M_{Gy} = g \sum_{n=1}^5 m_n l_n = 3,3 \text{ Nm} . \quad (12)$$

Das auftretende Greifmoment liegt mit $3,3 \text{ Nm}$ für den statischen Fall unter den maximal übertragbaren Moment der Greifer von $6,0 \text{ Nm}$. Das notwendige Antriebsmoment um die y-Achse im Punkt 2 berechnet sich zu

$$M_{Ay} = g \sum_{n=3}^5 m_n (l_n - l_2) = 3,0 \text{ Nm} . \quad (13)$$

und ist mit $3,0 \text{ Nm}$ identisch mit dem maximalen Antriebsmoment der Servoantriebe. Die Nachrechnung zeigt, dass die Greifmodule ausreichend dimensioniert sind, um die auftretenden Kräfte in Höhe von $17,7 \text{ N}$ und das auftretende Moment von $3,3 \text{ Nm}$ auf das Substrat zu übertragen. Die Antriebe in den Bewegungsmodulen sind für den statischen Fall ausreichend dimensioniert. Für den dynamischen Fall böten die verwendeten Aktoren nicht ausreichend Reserven.

KAPITEL 9

Vergleich des modularen mit einem integrierten Konzept

„Das Vergleichen ist das Ende des Glücks und der Anfang der Unzufriedenheit.“

Sören Aabye Kierkegaard

9.1 Der Kletterroboter RATNIC

9.1.1 Mechanik

Als Referenz zur modularen Eigenentwicklung steht der Kletterroboter RATNIC zur Verfügung. Dieser Roboter wurde speziell für das Klettern auf zylinderförmigen Substraten entwickelt (vgl. [Karguth 2010] und [Trommer et al. 2008]) und stellt somit ein Spezialistensystem dar. Durch einen direkten Vergleich kann untersucht werden, wie die kinematischen und energetischen Eigenschaften des modularen Systems gegenüber einer integrierten Lösung einzuschätzen sind. Der Vergleich mit nur einem Roboter kann nicht repräsentativ sein, sollte aber erste Tendenzen liefern.

RATNIC wurde auf der Grundlage von Erkenntnissen aus der Biomechanik des Kletterns entwickelt. Die Generierung der Kräfte und Momente für die Fortbewegung findet im Rumpf statt. Zu den greifbaren Substraten zählen Kabel, Kabelverbunde und Rohre mit Durchmessern zwischen 20 mm und 50 mm.

Der Rumpf hat einen mechanischen Freiheitsgrad von $f = 4$, was bedeutet, es sind vier elektromechanische Antriebe integriert (vgl. Abb. 61). Er teilt sich in einen Vorder- (2) und einen Hinterkörper (6), die über ein Rumpfelement (4) mit lokalen Elastizitäten und einem aktiven Mehrgelenksmechanismus (7) verbunden sind. Die Übertragung der mechanischen Energie wird über Zugmittel (5) bzw. über ein Stirnradgetriebe (nicht abgebildet) realisiert. Zur Energiespeicherung und Entlastung der Antriebe ist eine Feder (8) in den Antriebsstrang integriert. An den Rumpf sind zwei Greifer (1, 10) angebracht, es handelt sich dabei um Fingergreifer. Das Öffnen und Schließen des Greifers wird jeweils über einen elektromechanischen Antrieb realisiert (3, 11). Darüber

hinaus verfügt der hintere Greifer über eine aktive Verstellmöglichkeit der Länge der Greiferfinger (12).

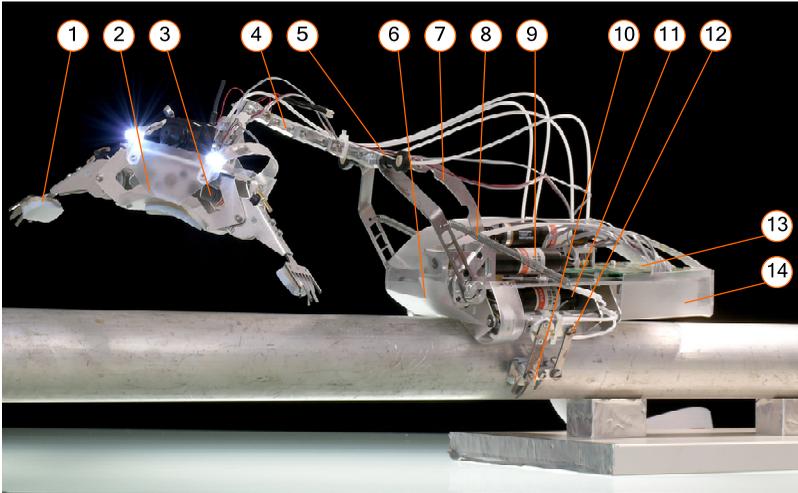


Abb. 61 – Kletterroboter RATNIC der Fa. Tetra GmbH. Der Roboter besteht aus Vorder- (2) und Hinterkörper (6), die durch eine aktive nachgiebige Struktur (4, 7) verbunden sind. Der Vorderkörper agiert als mechanischer Greifer (1) mit Antrieb (3). Der hintere Körper hat ebenfalls eine Funktion als Greifer (10), trägt zusätzlich die Aktorik für den hinteren Greifer (11) und für die Bewegungserzeugung (9). Die Antriebskräfte werden teilweise über Seilzüge (5) übertragen. Elastische Elemente zur Speicherung mechanischer Energie (8), die gesamte Elektronik (13) und eine Energieversorgung (14) sind integriert. (Foto: Tetra GmbH)

9.1.2 Elektronik und Steuerung

Die Elektronik (13) und die Energieversorgung (14) sind auf dem Roboter integriert. Ein Lithiumpolymer-Akkumulator mit einer Nennspannung von $11,1\text{ V}$ und einer Kapazität von $0,8\text{ Ah}$ sind im unteren Bereich des hinteren Körpers angebracht. Die Masse des Roboters mit $m_{\text{RATNIC}} = 1,1\text{ kg}$ ist als gering einzuschätzen. Die Elektronik hat die Aufgaben der Kommunikation zu einem Steuerungsrechner sowie die Realisierung der Regelung der Antriebe.

Gesteuert wird der Roboter durch einen Nutzer. Dieser kann durch ein Eingabegerät den Klettermodus wählen. Für unterschiedliche Situationen wie das Aufbringen des Roboters auf das Substrat, automatisches Klettern sowie händische Positionierung und Orientierung einzelner Greifer sind Modi programmiert. Weitere Informationen sind in [Schweitzer 2008] zu finden.

9.1.3 Bewegungsablauf RATNIC

Der Kletterroboter RATNIC verfügt über einen programmierten Bewegungszyklus zur Klettern an einem senkrechten Substrat. Die Geschwindigkeit kann dabei vom Nutzer während des Kletterns eingestellt werden. Während der durchgeführten Messung klettert der Roboter mit maximaler Geschwindigkeit. Andere Parameter werden nicht variiert.

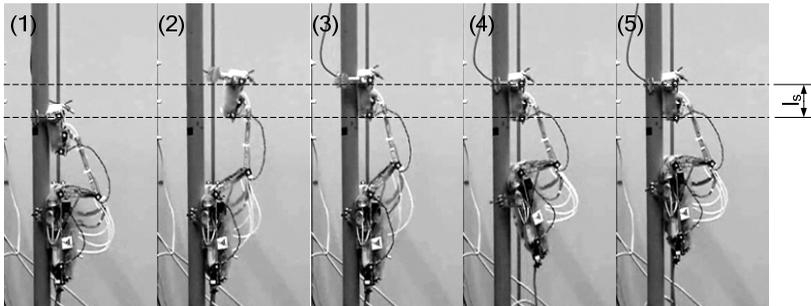


Abb. 62 – Bewegungsablauf des Roboters RATNIC. Dargestellt beim Klettern am vertikalen Substrat. Die Bewegungsrichtung ist senkrecht nach oben. Dabei wird nach einem kompletten Bewegungszyklus eine Schrittweite l erreicht. Zur besseren Lokalisation der Gelenkachsen und der Greifer wurden Marker am Roboter befestigt (rote LED)

Der Bewegungsablauf ist in Abb. 62 dargestellt und setzt sich wie folgt zusammen:

- (1) Zu Beginn des Zyklus befinden sich beide Greifer geschlossen am Substrat.
- (2) Der vordere Greifer wird geöffnet, der Vorderkörper wird vom Substrat gehoben und in Bewegungsrichtung geschoben.
- (3) Darauf folgend wird der vordere Greifer an das Substrat gesetzt und geschlossen.
- (4) Der hintere Greifer wird geöffnet, der Hinterkörper abgehoben und in Bewegungsrichtung bewegt.
- (5) Der hintere Körper wird an das Substrat gesetzt und der hintere Greifer geschlossen.

9.2 Konfiguration zum Klettern an zylinderförmigen Substraten

9.2.1 Aufbau des Systems

Aus den Modulen wurde zum Vergleich mit RATNIC eine zu diesem funktionsäquivalente Konfiguration erstellt (siehe Abb. 63). Die Kletteraufgabe besteht darin, an einem senkrecht montierten Substrat mit dem Durchmesser $d_{Sub} = 40 \text{ mm}$ senkrecht nach oben zu klettern.

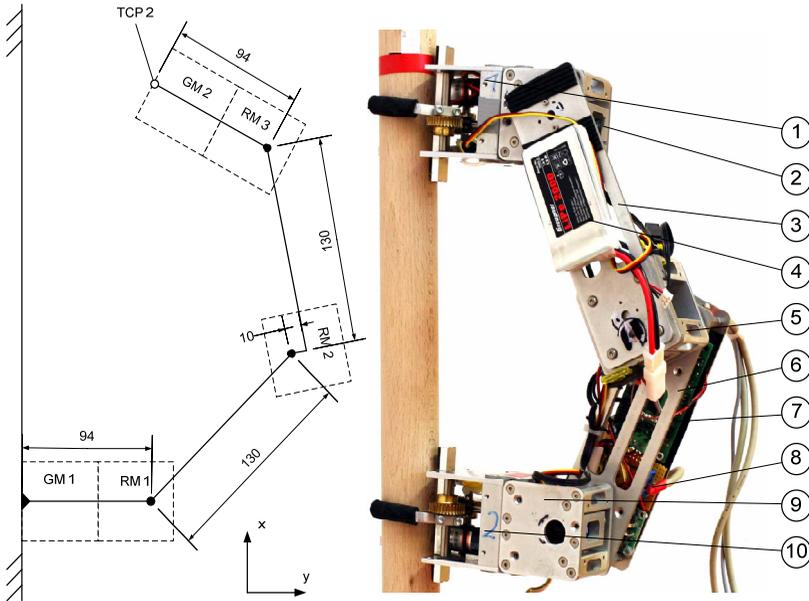


Abb. 63 – RATNIC-äquivalente Testkonfiguration. Der mechanische Freiheitsgrad der kinematischen Kette ist $f = 3$. Erreicht wird dieses durch drei Rotationsmodulen (2, 5, 9) mit parallelen Achsen, die durch zwei mechanische Koppelglieder (3, 6) verbunden sind. Als Greifer werden zwei Finger-Greifer-Module (1, 10) verwendet. Die Steuer- (7) und Messelektronik (8) sowie die Energieversorgung (4) sind integriert.

Die Konfiguration besteht aus zwei Finger-Greifern (2, 12), drei Rotationsmodulen (3, 6, 10), der Elektronik (1, 5, 9, 11), der Energieversorgung (7) und entsprechend passiven Koppelgliedern (4, 8). Die Masse der Testkonfiguration beträgt $m_{TK} = 1,59 \text{ kg}$. Sie wird im Folgenden als Vergleichskonfiguration bezeichnet.

Die kinematische Struktur ohne Greifer besitzt den Freiheitsgrad $f = 3$. Die drei Rotationsmodule sind über mechanische Koppellemente so verbunden, dass die Achsen der Gelenke parallel sind. Ist ein Greifer am Substrat fixiert, so ergibt sich für den zweiten Greifer eine ebene Bewegung mit einer rotatorischen und zwei translatorischen Freiheiten.

9.2.2 Bewegungsablauf der Vergleichskonfiguration

Die Anordnung der Module erlaubt für die Vergleichskonfiguration zwei Bewegungsarten. Die erste Bewegungsart ist analog zu der vorher geschriebenen Bewegungsart von RATNIC. Diese ist in Abb. 64 oben dargestellt. Bei dieser verbleibt der vordere Greifer bei der Bewegung immer vor dem hinteren. Die Steuerung des Roboters erfolgt vollständig durch den Nutzer, d. h. die Bewegungsabläufe sind nicht automatisiert.

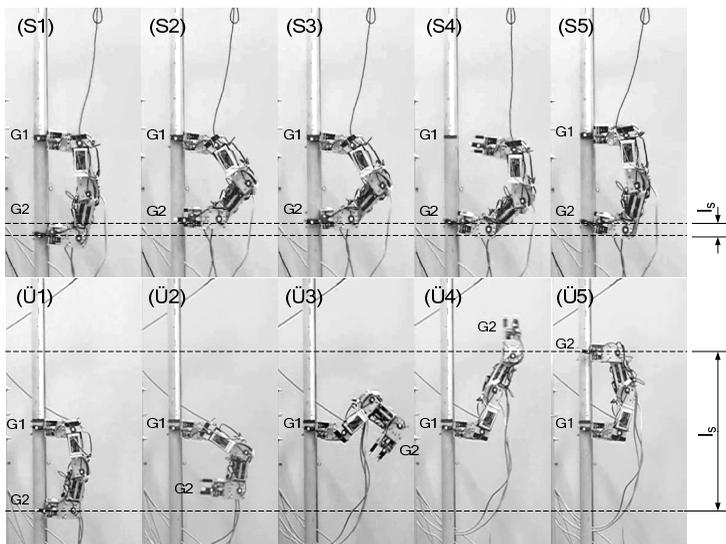


Abb. 64 – Bewegungsablauf der Vergleichskonfiguration. Dargestellt beim vertikalen Klettern. Es gibt zwei Bewegungsmodi: (oben) nachsetzende, RatNic-analoge Bewegung; (unten) überschlappende Bewegung, wobei beim Aufwärtsklettern der jeweilig untere Greifer (G2) gelöst und am substratfesten Greifer (G1) vorbeigeführt wird. Zur besseren Lokalisation der Gelenkachsen und der Greifer wurden Marker am Roboter befestigt (rote LED). l_s ist die Schrittlänge.

Die zweite Bewegungsart ist eine überschlagende. Ein halber Zyklus ist in Abb. 64 unten dargestellt:

- (Ü1) Zu Beginn des Zyklus' befinden sich beide Greifer geschlossen am Substrat.
- (Ü2) Der Greifer G2 wird geöffnet und vom Substrat gehoben.
- (Ü3) Der Greifer G2 wird am Greifer G1 vorbei nach oben bewegt.
- (Ü4) Der Greifer G2 wird an das Substrat geführt
- (Ü5) Der Greifer G2 wird geschlossen.
- (Ü6)–(Ü10) Der Ablauf erfolgt analog für Greifer G1 (nicht dargestellt)

Die Steuerung des Bewegungsablaufes erfolgt ebenfalls fast vollständig durch den Nutzer. Einzig für den Schritt (Ü3) respektive den Schritt (Ü8) ist ein Bewegungsmuster hinterlegt, welches eine automatische Bewegung ermöglicht. Dieses kann durch den Nutzer abgerufen werden. Die Positionierung der Greifer am Substrat, das Schließen und Öffnen der Greifer erfolgt durch den Nutzer.

9.3 Quantitativer Vergleich

9.3.1 Methode

Ziel ist die objektive Bewertung der Vergleichskonfiguration des modularen Systems anhand des Roboters RATNIC. Die beiden Systeme werden beim senkrechten Klettern an einem zylindrischen Substrat verglichen. Das Substrat wird vertikal angeordnet.

Dazu werden als kinematische Parameter die Schrittlänge l_s und die Klettergeschwindigkeit v ausgewählt. Die Schrittlänge l_s ist die durchschnittlich zurückgelegte Strecke bei einem Kletterzyklus, also zwischen dem Zeitpunkt t_0 des Abhebens von Greifer 1 bis zum Zeitpunkt t_1 des erneuten Abhebens des Greifers 1. Die Zyklusdauer t_s errechnet sich dann aus

$$t_s = t_1 - t_2 \tag{14}$$

und die Schrittlänge zu

$$l_s = l_1 - l_2. \quad (15)$$

Die Klettergeschwindigkeit wird als durchschnittliche Geschwindigkeit v über einen Kletterzyklus berechnet.

$$v = \frac{l_s}{t_s} \quad (16)$$

Es gilt, den unterschiedlichen technischen Parametern wie Masse und Abmaße der beiden Systeme gerecht zu werden und konstruktionsunabhängige Größen zu finden. Die Klettergeschwindigkeit und die Schrittlänge werden auf die mittlere Körperlänge (KL) l_{KL} des jeweiligen Roboters normiert. Die normierte Klettergeschwindigkeit v^* berechnet sich damit zu

$$v^* = \frac{v}{l_{KL}} \quad (17)$$

und die normierte Schrittlänge zu

$$l_s^* = \frac{l_s}{l_{KL}} \quad (18)$$

Als energetische Größen wird die aufgenommene elektrische Energie E_{el} pro Zyklus betrachtet. Die Energie wird allgemein als Integral der Leistung P berechnet, welche aus der Spannung U und dem Strom I bestimmt werden kann.

$$E_{el} = \int_{t_0}^{t_1} P_{el}(t) dt = \int_{t_0}^{t_1} I(t) U_V(t) dt \quad (19)$$

Der Strom I wird mit Hilfe eines Widerstandes R gemessen.

$$I(t) = \frac{U_I(t)}{R} \quad (20)$$

Damit berechnet sich die Energie E_{el} zu

$$E_{el} = \frac{1}{R} \int_{t_0}^{t_1} U_I(t) U_V(t) dt \quad (21)$$

Ebenso wird die Energie aus der durchschnittlichen Leistung während eines Kletterzyklus' berechnet.

$$E_{el} = \bar{P}_{el} t_s = \frac{1}{R} \frac{t_s}{n} \sum_{i=1}^n U_{1,i} U_{V,i}. \quad (22)$$

Während des senkrechten Kletterns steigt die potentielle Energie im Schwerefeld. Diese mechanische Energie E_{pot} pro Kletterzyklus kann berechnet werden zu

$$E_{pot} = mgl_s \quad (23)$$

Aus diesen beiden Größen kann ein energetischer Wirkungsgrad des Kletterns η_K berechnet werden, also das Verhältnis zwischen aufgenommener elektrischer und potentieller Energie.

$$\eta_K = \frac{E_{pot}}{E_{el}} = \frac{mgl_s}{\bar{P}_{el} t_s} \quad (24)$$

Der Wirkungsgrad wird zum Vergleich herangezogen. Die Angabe einer solchen Größe wurde in der Literatur nicht gefunden.

Als eine weitere Größe wird die maximale Traglast m_T experimentell bestimmt. Dazu wird ein Massestück mit einem Seil an dem Roboter befestigt, welches beim senkrechten Klettern entgegen der Schwerkraft nachgezogen wird. Der Roboter muss drei Schritte klettern, dann wurde das Experiment erfolgreich abgeschlossen. Die Masse m_T wird im Experiment in Schritten von $\Delta m = 100 \text{ g}$ erhöht, bis ein erfolgreicher Kletterzyklus nicht mehr möglich ist. Für die Vergleichbarkeit wird die auf die Körpermasse (KM) des Roboters m_R normierte Traglast m_T^* berechnet.

$$m_T^* = \frac{m_T}{m_R} \quad (25)$$

Aus der Schrittlänge lässt sich die Anzahl der notwendigen Greifvorgänge n_G pro Streckenlänge errechnen,

$$n_G = \frac{2}{l_s} \quad (26)$$

skaliert auf die Roboterlänge stellt sich die normierte Greifanzahl dar zu

$$n_G^* = \frac{2}{l_s^*} \quad (27)$$

Tab. 16 – Ergebnisse der Messung der kinematischen und energetischen Größen. (KL – mittlere Körperlänge, KM – Körpermasse)

Roboter	RATNIC	VERGLEICHSKONFIGURATION	
Bewegungsmuster	nachsetzend	nachsetzend	überschlagend
Parameter			
Masse des Testsystems m_R in kg	1,15	1,59	
minimale Körperlänge $l_{KL,min}$ in mm	355	247	
maximale Körperlänge $l_{KL,max}$ in mm	482	317	
mittlere Körperlänge l_{KL} in mm	419	282	
kinematisch mögliche Schritt- länge	127	70	522
Schrittlänge l_s in mm	64±2	57±1	511±5
normierte Schrittlänge l_s^* in KL	0,15±0,00	0,20±0,00	1,81±0,02
Anzahl der Greifvorgänge n_G in m^{-1}	31,3±0,9	35,1±0,6	3,9±0,0
normierte Anz. der Greifvor- gänge n_G^* in KL^{-1}	13,1±0,4	9,9±0,3	1,1±0,0
Geschwindigkeit v_s in $mm \cdot s^{-1}$	13±1	6±1	26±3
norm. Geschwindigkeit v_s^* in $KL \cdot s^{-1}$	0,03±0,00	0,02±0,00	0,09±0,01
Wirkungsgrad η_R in %	1,4±0,1	0,3±0,0	3,0±0,3
maximale Traglast m_T in kg	0,1	1,3	nicht ermittelt
norm. maximale Traglast m_T^* in KM	0,09	0,82	nicht ermittelt

9.3.2 Ergebnisse des Vergleichs

Die Roboter sind sich von der Masse her ähnlich, RATNIC wiegt $1,15 \text{ kg}$ bei einer mittleren Roboterlänge von 419 mm , die Vergleichskonfiguration $1,59 \text{ kg}$ bei einer Länge von 282 mm . RATNIC erzielt im Automatikklettermodus eine Geschwindigkeit von $13 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ bei einer Schrittlänge von 64 mm . Normiert sind das eine Schrittlänge von $0,15 \text{ KL}$ bzw. eine Geschwindigkeit von $0,03 \text{ KL}\cdot\text{s}^{-1}$. Dabei erzielt er einen Wirkungsgrad η_K von $1,4 \%$. Umgerechnet wird eine Anzahl der Greifvorgänge von $31,3 \text{ m}^{-1}$ benötigt.

Die Vergleichskonfiguration erreicht im nachsetzenden Modus eine Schrittlänge von 57 mm , normiert sind dies $0,2 \text{ KL}$. Die Geschwindigkeit ist $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ und damit $0,02 \text{ KL}\cdot\text{s}^{-1}$. Die ausgeführten Greifvorgänge liegen bei $35,3 \text{ m}^{-1}$. Es konnte ein Wirkungsgrad von $0,3 \%$ erreicht werden. Im überschlagenden Modus sind die Werte höher. Die Schrittlänge beträgt 511 mm , dies entspricht $1,81 \text{ KL}$. Die Klettergeschwindigkeit beträgt $26 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, dies sind $0,09 \text{ KL}\cdot\text{s}^{-1}$. Der Wirkungsgrad liegt bei $3,0 \%$, die Greifvorgänge bei $3,9 \text{ m}^{-1}$.

Die maximale Traglast, welche bei senkrechtem Klettern durch die Roboter mittels Seil nach oben gezogen werden kann, beträgt für RATNIC $0,1 \text{ kg}$ und für das modulare System $1,3 \text{ kg}$. Die normierten Werte sind für RATNIC $0,09 \text{ KM}$ und für das modulare System $0,82 \text{ KM}$. Für die überschlagende Bewegung wurde auf eine Ermittlung verzichtet, da eine funktionierende und nicht störende Befestigung der Massen nicht erreicht werden konnte.

9.3.3 Diskussion der Vergleichsergebnisse

Der Vergleich der beiden Roboter beim Klettern mit nachsetzendem Bewegungsmuster zeigt, dass sie etwa gleiche Werte bei Geschwindigkeit und Schrittlänge erreichen können. Die Klettergeschwindigkeit von RATNIC ist dabei geringfügig größer. Allerdings betrachtet man den Wirkungsgrad, sieht man, dass die Bewegung von RATNIC deutlich energieeffizienter ist.

Die einzelnen Module der Vergleichskonfiguration wurden mit hohen Anforderungen resultierend aus einer pessimalen Annahme heraus entwickelt. Die Greif- und Bewegungsmodule werden beim nachsetzenden Klettern in der Vergleichskonfiguration unter diesen Parametern belastet und somit kaum beansprucht. Dieses den Modulen immanente Potential zeigt sich bei der Ermittlung der maximalen Zuglast. RATNIC kann entsprechend den an ihn gestellten Anforderungen etwa $0,1 \text{ kg}$ respektive $0,09 \text{ KM}$ ziehen. Der Wert der Vergleichskonfiguration liegt mit $1,3 \text{ kg}$ bzw. $0,82 \text{ KM}$ deutlich darüber.

Durch die variable kinematische Struktur kann das modulare System eine weitere Bewegungsart umsetzen. In dieser können deutlich größere Schrittlängen erreicht werden. Die Anzahl der Greifvorgänge auf einer bestimmten Länge betragen nur ein Zehntel gegenüber dem nachsetzenden Klettern. Dies hat eine verringerte Wahrscheinlichkeit für einen Fehlgriff zur Folge; das Klettern ist robuster. Zudem fallen die zeitintensiven Phasen 2 (Zugreifen) und 4 (Lösen) des Greifens weg. Deren Dauer wurde nicht explizit bestimmt. Dies führt zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit und des Wirkungsgrades beim Klettern. Beide Werte liegen über denen des Kletterroboters RATNIC.

In den Ergebnissen spiegeln sich die unterschiedlichen Philosophien der Entwicklung der Roboter wider. Die Entwicklung von RATNIC wurde unter dem Aspekt des Leichtbaus und der Energieeffizienz betrieben. Der Roboter ist größer und dennoch leichter als die Vergleichskonfiguration.

Andererseits ermöglicht die modulare Struktur eine variable kinematische Struktur und eine höhere Beweglichkeit. Die aufgrund der modularen Struktur zwangsweise implementierten Schnittstellen und die Masse des Gesamtsystems führen zu einem niedrigeren Wirkungsgrad. Die Schrittlänge wurde mit Hilfe eines zusätzlichen Bewegungsmusters erhöht und die der Anzahl der Greifkontakte bezogen auf eine Kletterstrecke konnte reduziert werden. Infolge dessen wurde der Wirkungsgrad erhöht.

Es zeigt sich, dass mit Hilfe des modularen Systems eine Konfiguration aufgebaut werden konnte, die in der Leistungsfähigkeit durchaus mit einem Spezialsystem vergleichbar ist. Ein modulares System führt nicht zwangsläufig zu einem Effizienzverlust. Durch die variablere Struktur kann der Nachteil höherer Massen durch einerseits überdimensionierte und andererseits zusätzliche Komponenten ausgeglichen werden.

KAPITEL 10

Diskussion und Ausblick

*„Jede Sache hat zwei Seiten
- mindestens.“*

Ann Landers

10.1 Anwendung der Funktionsmodule

10.1.1 Fortbewegung

Die vorgestellte Referenzkonfiguration hat eine Masse von ca. 1,6 kg und liegt damit deutlich innerhalb des geforderten Bereiches (vgl. Abb. 65, rote Markierung). Die Bewegungsform ist der Klasse SDL (schwingender Antrieb, zeitdiskreter Kontakt und kleiner Kontakt) zuzuordnen, somit gehört die Vergleichskonfiguration der Klasse mit den meisten Vertretern an.

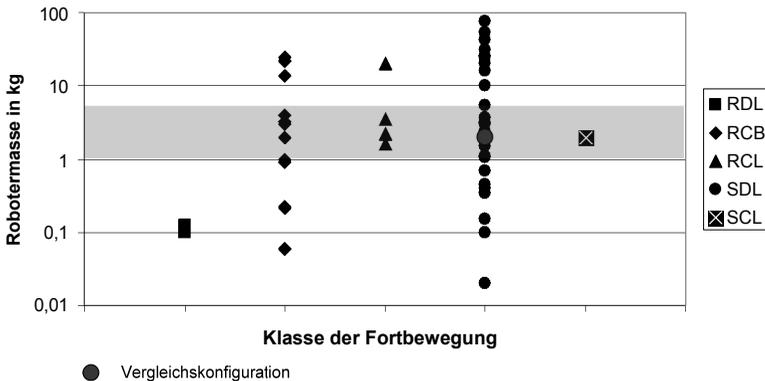


Abb. 65 – Systematik der Fortbewegung mit realisierter Vergleichskonfiguration. Die Masse von 1,7 kg liegt in dem geforderten Bereich zwischen 1 kg und 5 kg (grau markiert). Die in der Referenzkonfiguration umgesetzte Fortbewegung gehört zur größten Klasse nach [Yim 1995].

Es sind ausschließlich rotatorische Bewegungsmodule mit einer Winkelbegrenzung realisiert. Die Greifmodule sind nicht für eine Anwendung einer vollrotatorischen Antriebsbewegung ausgelegt. Dadurch bedingt können aktu-

ell nur Bewegungsarten umgesetzt werden, welche einen schwingenden Antrieb nutzen. Fortbewegungen mit vollrotatorischem Antrieb bieten andererseits ein großes Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten. Eine Entwicklung systemkompatibler Module mit solchen Eigenschaften in Kombination mit beispielsweise vollrotatorisch arbeitenden Magnetgreifern wäre sinnvoll. Auch Bewegungsmodule mit einer translatorischen Antriebsbewegung sind denkbar. Die Herausforderung hierfür besteht darin, die Masse gering zu halten. Hier bietet sich Potential für die Erweiterung des modularen Systems mit entsprechenden Bewegungsmodulen.

Wie bereits gezeigt, sind Kletterroboter mit zeitdiskretem Substratkontakt während des Kletterns aus kinematischer Sicht abwechselnd als System mit offenen und mit geschlossenen kinematischen Ketten zu interpretieren. Wird mittels Greifer der Kontakt zum Substrat hergestellt, nimmt der Zwang innerhalb der kinematischen Struktur des Kletterroboters zu.

Die verwendeten Aktoren sind mit einer Positionsregelung ausgestattet. Es kann zu internen Verspannungen kommen, wenn leichte Relativbewegungen zwischen den Greifern auftreten, beispielsweise durch elastische oder plastische Verformung des Substrats. Diesem Zwang kann auf zwei Wegen begegnet werden. Einerseits kann man die entsprechende Anzahl von Aktoren stromlos schalten, eine Energieeinsparung wäre ein zusätzlicher Effekt. Andererseits kann von einer Positions- auf eine Momentregelung übergegangen werden. Eine Möglichkeit dies umzusetzen, besteht in der Integration eines Antriebs mit immanenter Elastizität. Die Grundlagen dafür sind beispielsweise in [Fischheiter 2010] dargestellt.

10.1.2 Wirkpaarung

In Tab. 17 erfolgt eine Einordnung der Greifmodule nach ihrer Funktionsfähigkeit auf bestimmten Substraten. Mit Hilfe der drei entwickelten Greifer werden 20 der 36 Tabellenfelder abgedeckt. Speziell die dickzylindrischen Substrate sind bis jetzt nicht abgedeckt, ebenso die ebenen und nicht-magnetischen Substrate.

Dennoch konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, unterschiedliche Greifmethoden in einem modularen System unter identischen Anforderungen zu entwickeln und aufzubauen. Eine weitere Entwicklung von Greifern ist notwendig, um die gesamte Matrix zu füllen, welche in Tab. 17 dargestellt ist. Eine klassische Aufgabe mit Kosten-Nutzen-Relation der Kategorie „C“ in der „ABC-Kurve“ von Aufwand zu Nutzen.

Die Entwicklung eines strömungsbasierten fluidischen Greifers könnte hierbei weitere Anwendungsfelder abdecken. Allerdings ist das Prinzip mit einer hohen Leistungsaufnahme verbunden; dieser Schritt ist insbesondere unter der Anforderung der Energieautarkie mobiler Systeme sorgfältig zu diskutieren.

Tab. 17 – Einordnung der entwickelten Greifermodule. Der Aufbau der Tabelle ist analog zu Tab. 5. Hier sind Magnetgreifmodul (MGM), Unterdruckgreifmodul (UGM) und Fingergreifmodul (FGM) eingeordnet.

Material Gestalt	Magnetismus	weich-magnetisch		nicht magnetisch	
	Duktilität Form	nicht duktil	duktil	nicht duktil	duktil
glatt	eben	MGM, UGM	MGM, UGM	UGM	UGM
	dick- zylindrisch	-	-	-	-
	dünn- zylindrisch	FGM	FGM	FGM	FGM
rau	eben	MGM	MGM	-	-
	dick- zylindrisch	-	-	-	-
	dünn- zylindrisch	FGM	FGM	FGM	FGM
strukturiert	eben	MGM	MGM	-	-
	dick- zylindrisch	-	-	-	-
	dünn- zylindrisch	FGM	FGM	FGM	FGM

Die selbst entwickelten und gefertigten Greifer können in allen rotatorischen und translatorischen Koordinatenachsen Kräfte und Momente übertragen. Sie sind für den Einsatz an Kletterrobotern mit nur zwei Greifern entwickelt, aber prinzipiell auch an Robotern mit einer höheren Anzahl von Greifern einsetzbar. In Abb. 22 (S. 64) ist dargestellt, dass bei einer Greiferanzahl größer zwei, nicht in allen Kraft- und Momentachsen auch Lasten übertragen werden müssen. Wird sichergestellt, dass ein Roboter immer drei Greifer im belastbaren

Kontakt zum Substrat hat, muss jeder Greifer im Allgemeinen ausschließlich Kräfte übertragen. Voraussetzung dafür ist, dass die drei Greifer nicht auf einer Geraden positioniert sind. Diese Greifer könnten an die neue Greifaufgabe angepasst und damit wahrscheinlich kleiner und leichter konstruiert werden.

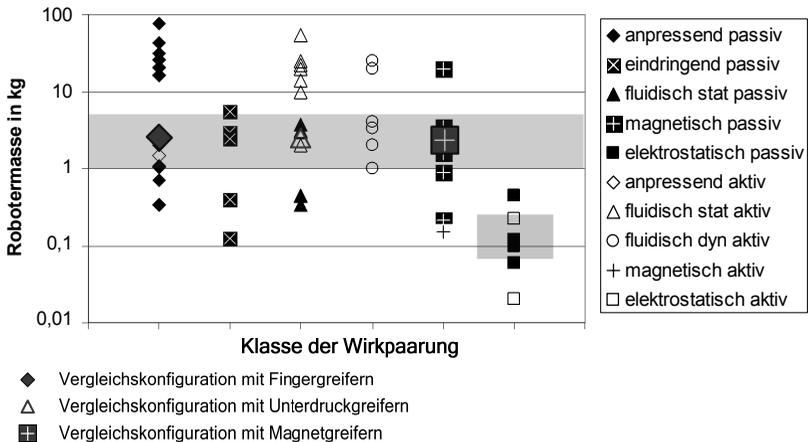


Abb. 66 – Systematik der Wirkpaarung ergänzt durch die Vergleichskonfiguration. Eingordnet ist die Vergleichskonfiguration mit den Fingergreifern, sowie in Anwendungen der Unterdruckgreifern und der Magnetgreifern (rot und größer markiert). Drei der sechs Klassen sind belegt. Die Roboter Masse für die Umsetzung der elektrostatischen Wirkpaarungen liegt orientiert am Stand der Technik bei ca. 100 g (blau markiert).

Die Referenzkonfiguration wird unter Verwendung der Fingergreifer realisiert. Anstelle der Fingergreifer könnten sowohl die Magnetgreifer als auch die Unterdruckgreifer verwendet werden. Anhand der technischen Daten sollte dies möglich sein, der experimentelle Beweis wurde bisher nicht erbracht. In Abb. 66 sind die Kletterroboter nach der Wirkpaarung klassifiziert dargestellt. Ergänzt man die möglichen Vergleichskonfigurationen, sind drei der sechs Klassen belegt (rot markiert und größer eingezeichnet). Theoretisch sollte im Rahmen der Festlegungen für das modulare System die Entwicklung eines mechanisch-eindringenden und eines fluidisch-dynamischen Greifers möglich sein. Die größte Herausforderung für den fluidisch-dynamischen Greifer besteht in der Bereitstellung der notwendigen Leistung über einen längeren Zeitraum auf dem modularen System. Das Prinzip beruht auf einer permanen-

ten Volumenverschiebung eines Fluids (Luft) und ist mit einem hohen Leistungsbedarf verbunden.

Für eine Nutzung der elektrostatischen Wirkpaarung scheint das selbst entwickelte modulare System nicht geeignet zu sein. Orientiert an in der Literatur identifizierten Kletterrobotern sollte die Masse des Roboters etwa 100 g betragen (vgl. Abb. 66 – blau markierter Bereich). Eine Realisierung eines modularen Systems dieser Größe ist vor allem eine Herausforderung aus fertigungstechnischer Sicht. Einsetzbar wäre z. B. das in [Varenberg et al. 2007] vorgestellte mikrostrukturierte Haftmaterial aus Polymer.

10.1.3 Energieversorgung

Das vorgestellte Energiemodul ist mechanisch und elektrisch kompatibel zum modularen System. Der verwendete Energiespeicher mit einer Ladungsspeicherkapazität von 0,85 Ah ist ausreichend für Experimente mit einer Dauer von ca. 20 min. Für längere Experimente sollte ein Speicher mit einer größeren Kapazität verwendet werden, kommerzielle Komponenten wären hierfür verfügbar. Ebenfalls ist die Verwendung mehrerer kleiner Energiespeicher denkbar, die parallel geschaltet werden. Allerdings widerspräche diese Modifikation der Strukturvariante mit einem zentralen Energiespeicher, ein erhöhter Verschaltungs- und Ladeaufwand wäre die Folge.

Die verwendeten LiPo-Akkumulatoren sind empfindlich gegenüber Tiefentladung. Eine Integration von Überwachungs- und perspektivisch von Energiemanagementfunktionen erfordert eine informationstechnische Einbindung des Energiemoduls. Die einheitliche Modulplatine in Kombination mit einer entsprechenden Adapterplatine ermöglicht die Integration einer solchen Funktion.

10.2 Modulare Struktur

10.2.1 Struktur des modularen Systems

Das erstellte modulare System ist heterogen und entspricht damit den Anforderungen. Die in Kap. 5.2 abgeleitete modulare Struktur ist im dem entwickelten und gefertigten modularen System abgebildet. Das „Geheimnisprinzip“ (information hiding) konnte erfolgreich auf das mechatronische System angewendet werden, das System ist so gestaltet, dass eine Kopplung ausschließlich über die in der Arbeit definierte Schnittstelle möglich ist.

Mögliche Strukturen des modularen Systems wurden bewertet, eine optimale Variante unter Berücksichtigung der Anzahl der Kopplungen und Anzahl von Funktionsgruppen wurde ausgewählt und konnte realisiert werden. Im modularen System ist, wie angestrebt, nur eine Ausführungsform einer Schnittstelle umgesetzt. Die Interaktion zwischen den Modulen beschränkt sich auf eine energetisch-mechanische Kopplung zur Übertragung von Bewegung, eine energetisch-elektrische Kopplung zur Versorgung der Module mit elektrischer Energie und eine informationelle Kopplung zur Übertragung der Informationen.

Die Unterscheidung in Funktionsmodule und Koppellemente wird als sinnvoll bewertet. Durch die Trennung können die Funktionsmodule nahezu beliebiger Lage zueinander orientiert werden, indem ein entsprechendes Koppellement entwickelt wird. Leistungs- und Informationsbus wurden in einer Serienschaltung umgesetzt. Die Kopplung mit einem PC über eine standardisierte Schnittstelle ist möglich.

Die Entwicklung einheitlicher Modulkomponenten als Grundlage der Entwicklung bietet eine Menge von Vorteilen. Durch deren Verwendung sind Anforderungen an den Entwicklungsprozess der verschiedenartigen Funktionsmodule expliziert. Als mechanische Komponente sei der einheitliche Modulrahmen vorgeschlagen. Dieser definiert beispielsweise den maximalen Bauraum für die anwendungsspezifischen Komponenten, stellt die mechanische Schnittstelle zur Verfügung und schränkt so den Lösungsraum ein. Wie dargestellt, besteht der Rahmen aus nur drei verschiedenen Elementen, welche in hoher Stückzahl gefertigt bzw. gekauft werden können. Eine Reduktion des zeitlichen Aufwands und der Kosten ist die Folge. Für die physische Umsetzung müssen zumeist nur geringfügige Anpassungsarbeiten durchgeführt werden. Die Grenzen der Verwendung einheitlicher Komponenten zeigen sich bei der Entwicklung des Magnetgreifermoduls. Funktionsbedingt konnte der einheitliche Rahmen nicht verwendet werden, eine Spezialentwicklung musste durchgeführt werden.

Als einheitliche elektronische Komponente wurde die Modulplatine entwickelt, welche in allen Funktionsmodulen eingesetzt werden kann. Auch hier zeigen sich ökonomische Vorteile durch eine hohe mögliche Stückzahl bei der Fertigung der Platine. Die Anpassung an die anwendungsspezifischen Komponenten erfolgt über eine Adapterplatine, welche im Rahmen des Entwicklungsprozesses für jeden Modultyp entwickelt wird. Die Schnittstellen des

Moduls sind in die einheitlichen Komponenten integriert. Bei Verwendung dieser ist eine Kompatibilität zum modularen System implizit gewährleistet.

10.2.2 Anwendung des modularen Systems

Ein Kletterroboter ist ein mobiles System, welches anders als z. B. bei Laufroboter, seine Lage im Raum im Extremfall mit dem Freiheitsgrad $f = 6$ ändern kann. Zudem ist die Umwelt oft unstrukturiert. Das Greifen des Roboters muss sehr robust sein, eine Fehlbedienung hat den Absturz und damit eine Beschädigung, Zerstörung oder sonstigen Verlust des Roboters zur Folge. Daraus resultieren hohe Anforderungen an die Steuerbarkeit. Damit kann ein solches Robotersystem als Entwicklungsplattform für Steuerungskonzepte mit Hilfe von Mehrkoordinateneingabegeräten genutzt werden. Das in den Experimenten verwendete „Gamepad“ bedurfte einer langen Lernphase beim Nutzer, um eine Bewegung „sicher“ steuern zu können. Hier ist ein Entwicklungsbedarf gegeben.

Das modulare System stellt einen Baukasten für mobile Roboter dar. Einerseits kann es als Entwicklungsplattform zur Nutzung durch Ingenieure gesehen werden. Aus den entwickelten und teilweise realisierten Modulen lässt sich eine Vielzahl verschieden strukturierter Kletterroboter aufbauen. Durch die Definition einer Schnittstelle und die Bereitstellung einheitlicher Komponenten können weitere Module extern entwickelt und in das modulare System eingebunden werden. Unterschiedliche Steuerungskonzepte können für das System entwickelt und auf diesem implementiert werden.

Andererseits könnte ein solches System für die Bionik der Bewegungssysteme, speziell bei der Überprüfung der Modellvorstellungen für das Klettern von Tieren interessant sein. Bei Tieren treten in biomechanischen Beobachtungen immer verschiedene Aspekte gemeinsam, aber in wechselnder Ausprägung auf („Multiparametersysteme“). Auf einer Roboterplattform können Experimente so angelegt werden, dass Effekte isoliert voneinander betrachtet und Hypothesen so gezielter überprüft werden können.

KAPITEL 11

Zusammenfassung

„Mein Ruf wird nach jedem Fehlschlag besser.“

George Bernhard Shaw

In dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Kletterroboters dargestellt. Klettern wird als substratgebundene Lokomotion verstanden, das Substrat soll dabei beliebig im Raum orientiert sein. Der Roboter soll die Fähigkeit besitzen, sich teilautonom auf unterschiedlichen Substraten bewegen zu können. Biologische Kletterer besitzen diese Fähigkeit, auf verschiedenen Substraten klettern zu können. Dennoch bieten biologische Studien nur wenige Ergebnisse, auf deren Grundlage ein Kletterroboter entwickelt werden kann.

Ein Teil der Anforderungen an den Entwicklungsprozess lässt sich aus einer ökologischen Betrachtung eines Kletterroboters ableiten. Mobile Roboter im Allgemeinen und Kletterroboter im Speziellen sind von einer Menge an Umweltfaktoren beeinflusst. Diese werden in robotische und arobotische Faktoren unterschieden. Als relevante arobotische Faktoren gehen das Substrat, die Schwerkraft und die Energieversorgung hervor.

Für den Entwicklungsprozess werden die Generierung von Bewegung und die Erzeugung eines Substratkontakts unabhängig voneinander betrachtet. Dies wird als Modellvorstellung gesehen, tatsächlich gibt es Wechselwirkung zwischen beiden Vorgängen. Der Kontakt zu einem Substrat wird durch einen Greifer hergestellt. Der Greifer und das Substrat bilden eine Wirkpaarung. Das Greifen des Kletterroboters wird analog zum Greifen in der Handhabungstechnik in vier Phasen unterschieden:

- 1. Phase: Positionieren
- 2. Phase: Zugreifen
- 3. Phase: Halten
- 4. Phase: Lösen

Eine abgeleitete Klassifikation anhand der Wirkpaarung teilt aktuelle Kletterrobotersysteme in Systeme mit feldbasierten und mechanischen Greifern ein.

Feldbasierte werden in elektrostatische und magnetische, die mechanische in fluidische und festkörperbasierte Wirkprinzipien unterteilt. Fluidische Greifer nutzen sowohl dynamische (strömungs-) als auch statische Effekte, mechanische Greifer können in eindringende und anpressende unterschieden werden. Generell unterscheiden kann man alle Prinzipien in aktive und passive Prozesse. Anhand dieser Einteilung wurde eine Matrix erarbeitet, welche die Beziehung zwischen Substratform, Substratmaterial und Greifprinzip darstellt.

Die Fortbewegung eines Kletterroboters wird durch eine Relativbewegung zwischen einen oder mehreren substratfesten Greifern und mindestens einem gelösten Greifer erzeugt. Eine Positionsveränderung des Schwerpunkts des Roboters ist die Folge. Zur Klassifikation werden die Kletterroboter in einer Systematik eingeordnet, welche für mobile Roboter mit terrestrischer Lokomotion entwickelt wurde. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Mehrzahl der in der Übersicht erfassten Roboter mit mehreren Greifern fortbewegen, welche einen zeitdiskreten Kontakt zum Substrat herstellen und durch oszillierende Extremitäten bewegt werden. Die zweite Klasse bilden die Kletterroboter, welche mit kontinuierlichem Kontakt zum Substrat funktionieren. Sie besitzt zumeist Räder oder Ketten, arbeiten demnach mit vollrotatorischen Extremitäten. Für einen Kletterroboters, auf dem eine Vielzahl von Greifprinzipien umgesetzt werden können, wird eine Masse von 1 kg bis 2 kg abgeleitet.

Um diese vielfältigen Lokomotions- und Greifprinzipien auf einem System zu implementieren, wird es als modulares Robotersystem entwickelt. Aktuelle modulare Robotersysteme unterscheiden sich grundsätzlich nach ihrer Möglichkeit Strukturen zu bilden in gitterförmige, verzweigte und kettenförmige Systeme. Unter dem Aspekt der Anwendung als Kletterroboter werden aktuelle kettenförmige modulare Robotersysteme eingeschätzt und eine Modulmasse von 0,25 kg und eine Modulgröße von 50 mm bis 60 mm abgeleitet.

Die Modularisierung stellt einen Prozess dar, der ausgehend von einem Ausgangssystem ein System in seine Teilsysteme, die Module zerlegt. Der Entwurfsprozess eines modularen mechatronischen Systems wird in Anlehnung an die Richtlinie VDI 2206 skizziert. Ziel der Modularisierung ist dabei ein System, welches aus verschiedenen Modulen besteht, zwischen denen die Kopplung gering ist. Als Ausgangssystem wird ein mechanisches Modell eines Kletterroboters gewählt, welcher die Anforderungen an die Domänen Mechanik, Elektrotechnik und Informationsverarbeitung definiert.

Anhand der Funktionsstruktur des Kletterroboters werden unterschiedliche Varianten eines modularen Systems erstellt und quantitativ bewertet. Als opti-

male Variante stellte sich dabei eine Struktur mit verteilter Informationsverarbeitung und zentralem Energiespeicher dar. Es handelt sich dabei um ein heterogen modulares System, welches aus funktionell unterschiedlichen Modulen besteht. Das System besteht grundsätzlich aus den Funktionsmodulen für das Greifen (Greifmodule) und das Erzeugen von Bewegung (Bewegungsmodule). Ein weiteres Modul ist das Energieversorgungsmodul. Die Module werden durch unterschiedliche mechanische Koppelemente über die definierte Schnittstelle verbunden.

Auf Grundlage der abgeleiteten Anforderungen, wird eine Anforderungsliste an die Funktionsmodule erarbeitet. Modulintern wird eine Struktur aus einheitlichen, anwendungsparametrisierbaren und anwendungsspezifischen Komponenten vorgeschlagen, welche domänenübergreifend umgesetzt wird. Als einheitliche mechanische Komponente wird ein Modulrahmen entwickelt, der eine Grundlage für alle Module bildet. Des Weiteren wird das Konzept einer einheitlichen modulinternen Elektronik vorgestellt. Diese wird mittels einer Erweiterungsplatine an die jeweiligen anwendungsspezifischen Modulkomponenten angepasst.

Nach den Anforderungen wurden drei Greifmodule, zwei Bewegungsmodule und ein Energiespeichermodul entwickelt. Die Greifmodule haben die Funktion eines Fingergreifers, eines Magnetgreifers und eines Unterdruckgreifers. Als Bewegungsmodule stehen Rotations- und ein Doppelrotationsmodule zur Verfügung.

Die Eigenschaften des modularen Systems wurden mit einem integrierten System verglichen. Dafür stand der Kletterroboter RATNIC zur Verfügung, welcher speziell für das Klettern auf zylindrischem Substrat entwickelt wurde. Eine funktionsäquivalente Konfiguration des modularen Systems besteht aus zwei Fingergreifern, drei Bewegungsmodulen, einem Energiemodul und mechanischen Koppelementen. In Experimenten konnte nachgewiesen werden, dass das modulare System bei gleicher Lokomotionsform in den kinematischen Parametern wie Geschwindigkeit und Schrittlänge vergleichbar, der Wirkungsgrad schlechter und die Traglast (Payload) höher ist. Durch die variable Kinematik des modularen System und der daraus resultierenden zusätzlichen Lokomotionsform kann hingegen eine höhere Leistungsfähigkeit erreicht werden. Der Nachteil des modularen Systems durch eine erhöhte Masse steht dem Vorteil der höheren Anpassbarkeit gegenüber.

Literaturverzeichnis

- ADAMS, D.; SCHWARZ, B.: *Per Anhalter durch die Galaxis: Roman*. 25. Aufl. München: Heyne, 2004
- ALBIEZ, J. C.: *Verhaltensnetzwerke zur adaptiven Steuerung biologisch motivierter Laufmaschinen*. Waabs: GCA-Verlag, 2007
- ANDRADA, E.; MÄMPEL, J.; SCHMIDT, A.; FISCHER, M. S.; KARGUTH, A.; WITTE, H.: Biomechanical analyses of rat locomotion during walking and climbing as a base for the design and construction of climbing robots. In: *5th International Conference on Comparing Design in Nature with Science and Engineering*. Pisa, Italien, 2010 (eingereicht)
- ARMS, A.; VOGES, D.; FISCHER, M. S.; PREUSCHOFT, H.: *Arboreal locomotion in small new-world monkeys*. In: *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie* (2002), S. 243–263
- ASBECK, A. T.; KIM, S.; MCCLUNG, A.; PARNES, A.; CUTKOSKY, M. R.: Climbing walls with microspines. In: *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.: May 15 - 19, 2006, [Orlando, Florida]*. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center, 2006, S. 4315–4317
- BALAGUER, C.; GIMÉNEZ, A.; PASTOR, J. M.; PADRÓN, V. M.; ABDERRAHIM, M.: *A climbing autonomous robot for inspection applications in 3D complex environments*. In: *Robotica* (2000), 18 - 3, S. 287–297
- BALAGUER, C. G. A.; HUETE, A. J.; SABATINI, A. M.; TOPPING, M.; BOLMSJO, G.: *The MATS robot: service climbing robot for personal assistance*. In: *Robotics & Automation Magazine, IEEE* 2006 (2006), 13-1, S. 51–58
- BERNS, K.; HILLENBRAND, C.; LUKSCH TOBIAS: Climbing robots for commercial applications—A survey. In: MUSCATO, Giovanni; LONGO, Domenico (Hrsg.): *Proceedings of the Sixth International Conference on Climbing and Walking Robots and Their Supporting Technologies, CLAWAR 2003: 17 - 19 September 2003*. Bury St.Edmunds: Professional Engineering, 2003, S. 771–776
- BÖGELSACK, Gerhard (Hrsg.); KALLENBACH, Eberhard (Hrsg.); LINNEMANN, Gerhard (Hrsg.): *Roboter in der Gerätetechnik*. Heidelberg: Huethig, 1985
- BROCKMANN, W.: Concept for Energy-autarkic, Autonomous Climbing Robots. In: TOKHI, M. O.; HOSSAIN, M. A.; VIRK, G. S. (Hrsg.): *Climbing and Walking Robots: Proceedings of the 8th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2005)*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006 (Springer-11647 /Dig. Serial), S. 107–114
- BROOKS, R. A.: *Achieving Artificial Intelligence through Building Robots*. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1986 (Technical Report: AIM-899)
- ČAPEK, K.: *WUR: Werstands Universal Robots: utopisches Kollektivdrama in drei Aufzügen*. Dt. von Otto Pick, 1922
- CARTMILL, M.: Climbing. In: *Functional vertebrate morphology*. Cambridge, Mass.: Belknap Pr., 1985
- CASTANO, A.; CHOKKALINGAM, R.; WILL, P.: Autonomous and Self-Sufficient CONRO Modules for Reconfigurable Robots. In: PARKER, Lynne E. (Hrsg.): *Distributed autonomous robotic systems 4:*
-

- [5th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems, DARS 2000, October 4 - 6, 2000, Knoxville, Tennessee]. Tokyo: Springer, 2000, S. 155–164
- CHOI, H. R.; PARK, J.; KANG, T.: *A self-contained wall climbing robot with closed link mechanism*. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 18 (2004), Nr. 4, S. 573–581
- CLARK, J. E.; GOLDMANN, D. I.; LIN, P. C.; LYNCH, G.: *Design of a Bio-inspired Dynamical Vertical Climbing Robot*. In: *Robotics: Science and Systems III* (2007)
- DITTRICH, Elmar: *Modular Robot Unit - Characterisation, Design and Realisation*. URL <http://birg.epfl.ch/webdav/site/birg/shared/import/migration/modrob.pdf> – Überprüfungsdatum 08.11.09
- DUDEK, G.; JENKIN, M. R. M.: *Computational principles of mobile robotics*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000
- EISOLD, R.: *Teilautonomes Klettern Mit einem modularen Kletterroboter*. Ilmenau, Technische Universität, Fakultät für Maschinenbau. Masterarbeit. 2010 (Skript unveröffentlicht)
- ELKMANN, N.; LUCKE, M.; KRÜGER, T.; KUNST, D.; STÜRZE, T.: *Kinematics and Sensor and Control Systems of the Fully Automated Facade Cleaning Robot SIRIUSc for Fraunhofer Headquarters in Munich*. In: LAUGIER, Christian; SIEGWART, Roland (Hrsg.): *Field and Service Robotics: Results of the 6th International Conference*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008 (Springer-11647 /Dig. Serial), S. 505–512
- FESTO AG & CO. KG: *BionicTripod mit FinCripper: Flexibler Tripod mit adaptivem Greifer*. 2009
- FISCHER, M. S.; KRAUSE, C.; LILJE, K. E.: *Evolution of chameleon locomotion, or how to become arboreal as a reptile*. In: *Zoology* (2009), Nr. 113, S. 67-74
- FISCHHEITER, L.: *Integrierte elastische Antriebe für die Kletterrobotik*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau. Diplomarbeit. 2010 (Skript unveröffentlicht)
- FREMEREY, M.; WITTE, H.: *Greifen bei Industrie- und Kletterrobotern Gemeinsamkeiten und Unterschiede*. CD-Rom. – Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau. 2008 (Skript unveröffentlicht)
- FUNDA, C.: *Entwicklung eines auf Unterdruck basierten Haftsystems und Integration in einen Kletterroboter*. Ilmenau, Technische Universität, Fakultät für Maschinenbau. Bachelorarbeit. 2009 (Skript unveröffentlicht)
- GLADUN, D.; GORB, S.: *Insect walking techniques on thin stems*. In: *Arthropod-Plant Interactions* (2007), Nr. 1, S. 77–91
- GONZALEZ-GOMEZ, J.; ZHANG, H.; BOEMO, E.: *Locomotion Principles of 1D Topology Pitch and Pitch-Yaw-Connecting Modular Robots*. In: HABIB, Maki K. (Hrsg.): *Bioinspiration and robotics: walking and climbing robots*. Wien: I-Tech Education and Publ., 2007, S. 403-428
- GORB, S. N.: *Biological contact systems with enhanced adhesion: What can we learn from evolution*. In: *Proceedings of the ASME/STLE International Joint Tribology Conference - 2007: Presented at 2007 ASME/STLE International Joint Tribology Conference, October 22 - 24, 2007, San Diego, California, U.S.A.* New York, NY: ASME, 2008, S. 965–967
-

- GORB, S. N.; SINHA, M.; PERESSADKO, A.; DALTORIO, K. A.; QUINN, R. D.: *Insects did it first: a micropatterned adhesive tape for robotic applications*. In: *Bioinspiration & Biomimetics* 2 (2007), Nr. 4, S. 117–125
- HAYNES, G. C.; KHRIPIN, A.; LYNCH, G.; AMORY, J.; SAUNDERS, A.; RIZZI, A. A.; KODITSCHKEK, D. E.: *Rapid Pole Climbing with a Quadrupedal Robot*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, S. 2767–2772
- HESSE, S.: *Robotergriefer: Funktion, Gestaltung und Anwendung industrieller Greiftechnik*. München: Hanser, 2004
- HILLENBRAND, C.; SCHMIDT, D.; BERNS, K.: *CROMSCI: development of a climbing robot with negative pressure adhesion for inspections*. In: *Industrial Robot: An International Journal* 35 (2008), Nr. 3, S. 228–237
- HOPPEN, P.: *Autonome mobile Roboter: Echtzeitnavigation in bekannter und unbekannter Umgebung*. Mannheim: BI-Wissenschaftsverlag, 1992
- ICHBIAH, D.: *Roboter: Geschichte, Technik, Entwicklung*. Dt. Erstausg. München: Knesbeck, 2005
- INNOVATION FIRST, Inc: *MagBot Model 1*. URL <http://www.vexrobotics.com/vex-magnetic-climbing-robot-m1.shtml> – Überprüfungsdatum 05.11.09
- INNOVATION FIRST, Inc: *MagBot Model 2*. URL <http://www.vexrobotics.com/vex-magnetic-climbing-robot-m2.shtml> – Überprüfungsdatum 05.11.09
- KARGUTH, A.: *RatNic: Die kletternde Roboterratte*. TETRA Gesellschaft für Sensorik, Robotik und Automation mbH, Ilmenau, 2010
- KENNEDY, B.; OKON, A.; AGHAZARIAN, H.; BADESCU, M.; BAO, X.; BAR-COHEN, Y.; CHANG, Z.; DABIRI, B. E.; GARRETT, M.; MAGNONE, L.; SHERRIT, S.: *Lemur IIb: A Robotic System for Steep Terrain Access*. In: TOKHI, M. O.; HOSSAIN, M. A.; VIRK, G. S. (Hrsg.): *Climbing and Walking Robots: Proceedings of the 8th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2005)*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006 (Springer-11647 /Dig. Serial]), S. 1077–1084
- KIM, H.; KIM, D.; YANG, H.; LEE, K.; SEO, K.; CHANG, D.; KIM, J.: *Development of a wall-climbing robot using a tracked wheel mechanism*. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 22 (2008), Nr. 8, S. 1490–1498
- KOCH, T.: *Entwicklung eines Greifermoduls für ein modulares Robotersystem*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau. Studienjahresarbeit. 2010 (Skript unveröffentlicht)
- KUROKAWA, H.; KAMIMURA, A.; YOSHIDA, E.; TOMITA, K.; KOKAJI, S.; MURATA, S.: *M-TRAN II: metamorphosis from a four-legged walker to a caterpillar*, Bd. 3. In: *Proceedings: October 27 - 31, 2003, Las Vegas, Nevada*. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center, 2003, S. 2454–2459
- LEHMANN, L.: *Konzeption und Konstruktion eines adaptiven Greifers für die Robotik*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau. Diplomarbeit. 2008 (Skript unveröffentlicht)
- LENK, A.; PFEIFER, G.; WERTHSCHÜTZKY, R.: *Elektromechanische Systeme: Mechanische und akustische Netzwerke, deren Wechselwirkungen und Anwendungen*. Berlin: Springer, 2001

- LIIJE, K. E.: *Arboreale Lokomotion beim Chamäleon (Chamaeleo calyptratus)*. Dissertation. Jena, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Biologisch-Pharmazeutischen Fakultät. 2005.
- LONGO, D.; MUSCATO, G.: *The Alicia³ climbing robot: a three-module robot for automatic wall inspection*. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 13 (2006), Nr. 1, S. 42–50
- LONGO, D.; MUSCATO, G.: SCID - a non-actuated robot for walls exploration, Bd. 2. In: *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics proceedings: 8 - 12 July 2001, Teatro Sociale, Como, Italy*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2001, S. 874–879
- LONGO, D.; MUSCATO, G.: Adhesion Techniques for Climbing Cobots: State of the Art an Experimental Consideration. In: MARQUES, L. (Hrsg.): *Advances in Mobile Robotics: Proceedings of the Eleventh International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Coimbra, Portugal, 8 - 10 September 2008*. Singapore: World Scientific, 2008, S. 6–28
- MAEHLE, Erik: *Projektseite Climbing Robots*. URL <http://www.iti.uni-luebeck.de/index.php?id=climb> – Überprüfungsdatum 05.11.09
- MÄMPEL, J.; ANDRADA, E.; TROMMER, C.; KARGUTH, A.; FISCHER, M. S.; VOIGT, D.; GORB, S. N.: InspiRat - Towards a Biologically Inspired Climing Robot for the Inspection of Linear Structures. In: MARQUES, L. (Hrsg.): *Advances in Mobile Robotics: Proceedings of the Eleventh International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Coimbra, Portugal, 8 - 10 September 2008*. Singapore: World Scientific, 2008a, S. 206–213
- MÄMPEL, J.; EISOLD, R.; KEMPF, W.; SCHILLING, C.; WITTE, H.: A Modular Concept for a Biologically Inspired Robot. In: KOZŁOWSKI, Krzysztof R. (Hrsg.): *Robot Motion and Control 2009*. London: Springer-Verlag London, 2009 (Springer-11647 /Dig. Serial], 396), S. 391-399
- MCCLOY, D.; HARRIS, M. J.: *Robotertechnik: Einführung*. Weinheim: VCH, 1989 (Robotik)
- MINOR, M. A.; MUKHERJEE, R.: *Under-actuated kinematic structures for miniature climbing robots*. In: *Journal of Mechanical Design (Transactions of the ASME)* 125 (2003), Nr. 2, S. 281–291
- MIYAKE, T.; ISHIHARA, H.; YOSHIMURA, M.: Basic studies on wet adhesion system for wall climbing robots. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007: IROS 2007; Oct. 29, 2007 - Nov. 2, 2007, San Diego, CA*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2007, S. 1920–1925
- MOORE, E. Z.; CAMPBELL, D.; GRIMMINGER, F.; BUEHLER, M.: Reliable Stair Climbing in the Simple Hexapod 'RHEx'. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA 2002, 2002, Nr. 3, S. 2222-2227*
- MORREY, J. M.; LAMBRECHT, B.; HORCHLER, A. D.; RITZMANN, R. E.; QUINN, R. D.: Highly Mobile and Robust Small Quadruped Robots. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003, S. 82–87*
- MURATA, S.; KUROKAWA, H.: *Self-reconfigurable robots*. In: *Robotics & Automation Magazine, IEEE* 14 (2007), Nr. 1, S. 71–78
- MYERS, G. J.: *Composite/structured design*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1978
- NARDELLI, M.; JARDON, A.; STAROVEROV, P.; GIMÉNEZ, A.; BALAGUER, C.: System identification and control of the climbing robot ROMA II. In: *5th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2002)*. 2002
-

- NIEDERBERGER-ENGINEERING AG: *Gecko III Plus: für flache und geneigte Ebenen*. (Broschüre). 2008.
- NYAKATURA, J. A.; FISCHER, M. S.; SCHMIDT, M.: *Gait parameter adjustments of cotton-top tamarins (*Saguinus oedipus*, Callitrichidae) to locomotion on inclined arboreal substrates*. In: *American Journal of Physical Anthropology* 135 (2007), Nr. 1, S. 13–26
- OBERMAIER, A.: *Praktikumsbericht Kletterrobotik*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau. 2009
- PALMER, L. R.; DILLER, E. D.; QUINN, R. D.: Design Aspects of a Climbing Hexapod. In: *Proceedings of 12th International Conference on Climbing and Walking Robots 2009*, 2009
- PARNAS, D. L.; CLEMENTS, P. C.; WEISS, D. M.: *The Modular Structure of Complex Systems*. In: *IEEE Transactions on Software Engineering* SE-11 (1985), Nr. 3, S. 259–266
- PFEIFER, Rolf: *Understanding Intelligence: Understanding Intelligence*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1999
- POVH, Bogdan (Hrsg.); RITH, Klaus (Hrsg.); SCHOLZ, Christoph (Hrsg.); ZETSCHKE, Frank (Hrsg.): *Teichen und Kerne: Eine Einführung in die physikalischen Konzepte*. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009 (Springer-11777 /Dig. Serial)
- PREHLAD, H.; PELRINE, R.; STANFORD, S.; MARLOW, J.; KORNBLUH, R.: *Electroadhesive robots—wall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology*. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008: ICRA 2008; 19 - 23 May 2008, [Pasadena, CA]*. Piscataway, NJ: IEEE, 2008, S. 3028–3033
- PREUSCHOFT, H.: *What does "arboreal locomotion" mean exactly and what are the relationships between "climbing", environment and morphology?* In: *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie* 83 (2002), 2-3, S. 171–188
- PREUSCHOFT, H.; GÜNTHER, M. M.; CHRISTIAN, A.: *Size Dependence in Prosimian Locomotion and Its Implications for the Distribution of Body Mass*. In: *Folia Primatologica* 1998 (1998), Nr. 69, S. 60–81
- PREUSCHOFT, H.; WITTE, H.; CHRISTIAN, A.; RECKNAGEL, S.: *Körpergestalt und Lokomotion bei großen Säugetieren*. In: *Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft* (1994), S. 147–163
- PREUSCHOFT, H.; WITTE, H. f.; FISCHER, M. S.: Locomotion in nocturnal prosimians. In: ALTERMAN, L.; DOYLE, Gerald A.; IZARD, M. Kay (Hrsg.): *Creatures of the dark: The nocturnal prosimians*. New York: Plenum Press, 1995, S. 453–472
- RAFFLE, H. S.; PARKES, A. J.; ISHII, H.: Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory. In: *CHI 2004 connect: Conference on Human Factors in Computing Systems; April 24 - 29, Vienna, Austria; conference proceedings*. New York, NY: ACM Press, 2004 (CHI letters, 6,1), S. 647–654
- RANASINGHE, N.; EVERIST, J.; SHEN, W.: Modular Robot Climbers. In: *IEEE/RJSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007: IROS 2007; Oct. 29, 2007 - Nov. 2, 2007, San Diego, CA*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2007
- REIBENWEBER, B.: *Feldbusysteme zur industriellen Kommunikation*. 3., vollst. überarb. Aufl. München: Oldenbourg-Industrieverl., 2009

- ROCHAT, F.; SCHOENEICH, P.; NGUYEN, O. T.-D.; MONDADA, F.: TRIPILLAR: Miniature magnetic caterpillar climbing robot with plane transition ability. In: TOSUN, O.; AKIN, H. L.; TOKHI, M. O.; VIRK, G. S. (Hrsg.): *Proceedings of 12th International conference on climbing and walking robots and the support technologies for mobile machines (CLAWAR 2009)*, 2009, S. 343-350
- SALEMI, B.; MOLL, M.; SHEN, W.: SUPERBOT: A Deployable, Multi-Functional, and Modular Self-Reconfigurable Robotic System. In: *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006: Oct. 2006, [Beijing, China]*. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center, 2006, S. 3636–3641
- SALTARÉN, R.; ARACIL, R.; REINOSO, O.; YIME, E.: Climbing with Parallel Robots. In: HABIB, Maki K. (Hrsg.): *Bioinspiration and robotics: walking and climbing robots*. Wien: I-Tech Education and Publ., 2007, S. 209–226
- SANTOS, D.; HEYNEMAN, B.; SANGBAE KIM; ESPARZA, N.; CUTKOSKY, M. R.: Gecko-inspired climbing behaviors on vertical and overhanging surfaces. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008: ICRA 2008: 19 - 23 May 2008, [Pasadena, CA]*. Piscataway, NJ: IEEE, 2008, S. 1125–1131
- SAUNDERS, A.; GOLDMANN, D. I.; FULL, R. J.; BUEHLER, M.: *The RiSE climbing robot: body and leg design*. In: *Proceedings of SPIE* (2006), Nr. 6230, S. 623017-1- 623017-17
- SAVALL, J.; AVELLO, A.; BRIONES, L.: Two compact robots for remote inspection of hazardous areas innuclear power plants, Bd. 3. In: *Proceedings: May 10 - 15, 1999, Marriott Hotel, Renaissance Center, Detroit, Michigan*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1999, S. 1993–1998
- SCHEIDEGGER, N.; MONDADA, F.; BONANI, M.; SIEGWART, R.: Bi-pedal Robot for Rescue Operations. In: *Proceedings of 9th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machine (Clawar 2006)*, 2006, S. 425–430
- SCHERGE, M.; GORB, S. N.: *Biological micro- and nanotribology: Nature's solutions*. Berlin: Springer, 2001
- SCHILLING, C.: *Vorlesung Umweltanalytik: Übersicht Roboterökologie*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau. 2009 (Skript unveröffentlicht)
- SCHMIDT, M.: *Quadrupedal locomotion in squirrel monkeys (Cebidae: Saimiri sciureus): A cineradiographic study of limb kinematics and related substrate reaction forces*. In: *American Journal of Physical Anthropology* 128 (2005), Nr. 2, S. 359–370
- SCHMIERER, G.: *Ein modulares Bankkastensystem für Kletterroboter nach dem Gleitrahmenprinzip*. Heimsheim: Jost-Jetter, 2001
- SCHNEIDER, Uwe (Hrsg.); WERNER, Dieter (Hrsg.); EBERT, Joachim (Hrsg.): *Taschenbuch der Informatik: Mit 114 Tabellen*. 4., aktualisierte Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2001
- SCHNELL, G.; WIEDEMANN, B.: *Busysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik: Grundlagen, Systeme und Trends der industriellen Kommunikation*. 7., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008 (Praxis)
- SCHWEITZER, M.: *Algorithmen zur energieeffizienten Steuerung bionisch inspirierter Bewegungssysteme*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Informatik und Automatisierung. 2008, (Skript unveröffentlicht)
-

- SIMONS, F.: *Verhalten von passiv betriebenen Sauggreifern unter der Kräfteinwirkung von Kletterrobotern*. Heimsheim, Stuttgart: Jost-Jetter-Verl.; Univ., 2006
- SONG, Y. K.; LEE, C. M.; KOO, I. M.; TRAN, D. T.; MOON, H.; CHOI, H. R.: Development of wall climbing robotic system for inspection purpose. In: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: [IROS 2008]; Nice, France, 22 - 26 September 2008*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2008, S. 1990–1995
- SPROEWITZ, A.; BILLARD, A.; DILLENBOURG, P.; IJSPEERT, A. J.: Roombots — Mechanical Design of Self-Reconfiguring Modular Robots for Adaptive Furniture. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009: ICRA '09; Kobe, Japan, 12 - 17 May 2009*. Piscataway, NJ: IEEE, 2009, S. 4259 - 4264
- TACHE, F.; FISCHER, W.; SIEGWART, R.; MOSER, R.; MONDADA, F.: Compact magnetic wheeled robot with high mobility for inspecting complex shaped pipe structures. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007: IROS 2007; San Diego, CA. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2007, S. 261–266*
- TAVAKOLI, M.; ZAKERZADEH, M. R.; VOSSOUGH, G. R.; BAGHERI, S.: *A hybrid pole climbing and manipulating robot with minimum DOF's for construction and service applications*. In: *Industrial Robot: An International Journal* 32 (2005), Nr. 2, S. 171–178
- TAVAKOLI, M.; MARJOVI, A.; MARQUES, L.; ALMEIDA, A. T. de: 3DCLIMBER: A climbing robot for inspection of 3D human made structures. In: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: IROS 2008; Nice, France. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2008, S. 4130–4135*
- TREPL, L.: *Allgemeine Ökologie*. Frankfurt am Main, Berlin, Bern, Bruxelles, New York, Oxford, Wien: Lang, 2005
- TROMMER, C.; KARGUTH, A.; MÄMPEL, J.; ANDRADA, E.: *InspiRat - Structure and Design of the Nature Inspired Climbing Robot RatNic: Prospects in mechanical engineering*. In: *Proceedings of the 53rd Internationales Wissenschaftliches Kolloquium* (2008), S. 33–34
- UNVER, O.; UNERI, A.; AYDEMIR, A.; SITTI, M.: *Geckobot: a gecko inspired climbing robot using elastomer adhesives*. In: *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.: May 15 - 19, 2006, [Orlando, Florida]*. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center, 2006, S. 1050–4729
- UNVER, O.; SITTI, M.: *Tankbot: A miniature, peeling based climber on rough and smooth surfaces*. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009: ICRA '09; Kobe, Japan, 12 - 17 May 2009*. Piscataway, NJ: IEEE, 2009, S. 2282–2287
- Varenberg, M.; Gorb, S. N.: *Shearing of fibrillar adhesive microstructure: friction and shear-related changes in pull-off force*. In: *Journal of the Royal Society* 4 (2007), S. 721–725
- NORM VDI 2860: *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*. 1990
- NORM, VDI 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, 2006

- VOIGT, D.; GORB, E.; GORB, S.: *Plant surface–bug interactions: Dicyphus errans stalking along trichomes*. In: *Arthropod-Plant Interactions* (2007), Nr. 1, S. 221–243
- WILE, G. D.; DALTRIO, K. A.; DILLER, E. D.; PALMER, L. R.; GORB, S. N.; RITZMANN, R. E.; QUINN, R. D.: *Screenbot: Walking Inverted Using Distributed Inward Gripping*. In: *Proceedings of 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008, S. 1513–1518
- WITTE, H.; GÜNTHER, M. M.: *Die Bewegungsanalyse ist das wichtigste Werkzeug der Biomechanik zur Beantwortung klinischer Fragestellungen. Wie wähle ich die richtigen Verfahren und Geräte aus?* In: JEROSCH, Jörg (Hrsg.): *Rechnergestützte Verfahren in Orthopädie und Unfallchirurgie: Neue Techniken zur Informationsvermittlung - Forschung - Lehre - Patientenversorgung - Qualitätssicherung - Internet-Adressen*. Darmstadt: Steinkopff, 1999, S. 121–144
- WITTE, H. f.; HOFFMANN, H.; HACKERT, R.; SCHILLING, C.; FISCHER, M. S.; PREUSCHOFT, H.: *Biomimetic robotics should be based on functional morphology*. In: *Journal of Anatomy* 204 (2004), Nr. 5, S. 331–342
- XIAO, J.; SADEGH, A.: *City-Climber: A New Generation Wall-climbing Robots*. In: ZHANG, Houxiang (Hrsg.): *Climbing & walking robots: Towards new applications*. Wien: I-Tech Education and Publ., 2007, S. 383–402
- YANQIONG, F.; LIBO, S.: *Design and Analysis of Modular Mobile Robot with Magnetic Wheels*. In: *WSEAS TRANSACTIONS on APPLIED and THEORETICAL MECHANICS* 3 (2008), Nr. 12, S. 902–911
- YIM, M.; SHEN, W.; SALEMI, B.; RUS, D.; MOLL, M.; LIPSON, H.; KLAVINS, E.; CHIRIKJIAN, G. S.: *Modular Self-Reconfigurable Robot Systems: Grand Challenges of Robotics*. In: *Robotics & Automation Magazine, IEEE* 14 (2007), Nr. 1, S. 43–52
- YIM, M.: *Locomotion With an Unit-Modular Reconfigurable Robot*. PhD Thesis. Stanford, Kalifornien, USA. 1995
- YONEDA, K.; OTA, Y.; HIRANO, K.; HIROSE, S.: *Development of a Light-Weight Wall Climbing Quadruped with Reduced Degrees of Freedom*. In: *Proc. of 4th International Conference on Climbing: (CLAWAR 2001)*, 2001, S. 907–912
- YOON, Y.; RUS, D.: *Shady3D: A Robot that Climbs 3D Trusses*. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007: 10 - 14 April 2007, [Roma, Italy]*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2007, S. 4071–4076
- ZENTNER, L.; BÖHM, V.: *Zur Anwendung nachgiebiger Mechanismen*. In: *Konstruktion* (2005), 11/12, S. 49–50
- ZHANG, H.; ZHANG, J.; GUANGHUA, Z.; WANG, W.; RONG, L.: *Sky Cleaner 3*. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* (2006), S. 32–41
- ZHANG, Houxiang (Hrsg.): *Climbing & walking robots: Towards new applications*. Wien: I-Tech Education and Publ., 2007
- ZHU, J.; SUN, D.; TSO; SHIU-KIT: *Development of a Tracked Climbing Robot*. In: *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 35 (2004), Nr. 4, S. 427–443
- Zimmermann, K.; Zeidis, I.; Behn, C.: *Mechanics of Terrestrial Locomotion: With a Focus on Non-pedal Motion Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
-

LITERATURVERZEICHNIS

ZÖPPIG, V.; KALLENBACH, E.; SCHMIDT, J.: *Entwurf volumenintegrierter netzwerkfähiger Antriebssysteme mit modularer Mikrosystemtechnik; Match-X in der Antriebstechnik*. In: *VDI-Berichte 1892: Mechatronik 2005 Innovative Produktentwicklung*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2005 (1), S. 499–516

ZYKOV, V.; CHAN, A.; LIPSON, H.: *Molecubes: An open-source modular robotics kit*. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007: IROS 2007; Oct. 29, 2007 - Nov. 2, 2007, San Diego, CA*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2007

Thesen

Eine zuverlässig belastbare Kopplung zwischen Greifer und Substrat stellt die zentrale Problemstellung im Entwicklungsprozess eines Kletterroboters dar. Dabei müssen variable Wechselwirkungen zur dreidimensional strukturierten Umgebung berücksichtigt werden.

Die Greifer eines Kletterroboters müssen an variable Substrattypen anpassbar sein.

Modularen Systemen ist diese Anpassungsfähigkeit zum Aufbau verschiedener komplexer Systeme höherer Funktionalität aus wenigen standardisierten Grundbausteinen immanent.

Der funktionelle Vorteil modularer Systeme liegt in einer höheren Anpassbarkeit an die Umgebung. Dem gegenüber steht der Nachteil einer erhöhten Masse im Vergleich zu nicht-modularen Systemen.

Die Entwicklung eines modularen Kletterroboters ist als dreistufiger Entwicklungsprozess nach dem V-Modell der Richtlinie VDI 2206 (Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme) durchzuführen.

Ein modulares System mit zentraler Energiespeicherung und verteilter Informationsverarbeitung ist unter dem Gesichtspunkt minimaler Anzahl der Kopplungen für einen leichten Kletterroboter optimal.

Die Verwendung eines einheitlichen Modulrahmens und einer einheitlichen internen Elektronik reduziert den Entwicklungsaufwand und somit auch die Herstellungskosten.

Eine Kompatibilität der aufgebauten Module zueinander ist zwangsläufig durch die Integration der Schnittstelle in einheitliche Modulkomponenten gegeben.

Die im synthetischen Teil der Arbeit entwickelten und aufgebauten Funktionsmodultypen sind aufgrund ihrer technischen Parameter geeignet, ein Spektrum an Kletterrobotern mit kinematisch variabler Struktur aufzubauen.

Gewichts- und Leistungsunterschiede zwischen spezialisierten und standardisierten modularen Kletterrobotern sind geringer als a priori anzunehmen.

A Anhang

A.1 Modularisierungsvarianten

A.1.1 Variante „Ref“ – Referenzvariante

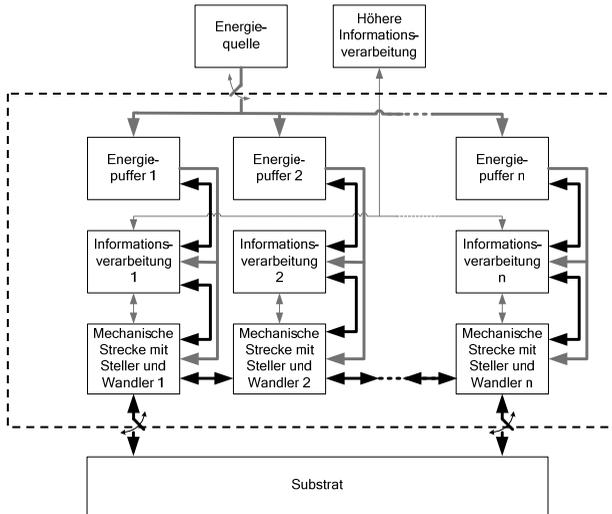


Abb. A1– Referenzsystem für die Modularisierung

Tab. A1 – Anzahl (Kopplungen, Module und Funktionsblöcke - Var. Ref)

Kriterien		Anzahl allgemein	Anzahl $n=8$
Kopplung	informationelle Kopplung	$3n+1$	25
	mechanische Kopplung	$6n$	48
	elektrische Kopplung	$4n+1$	33
Entwicklungsaufwand	Modulanzahl	$3n$	24
	Summe der Funktionen	$3n$	24

A.1.2 Variante „E_{int}I_{int}“ - Energie integriert, IV integriert

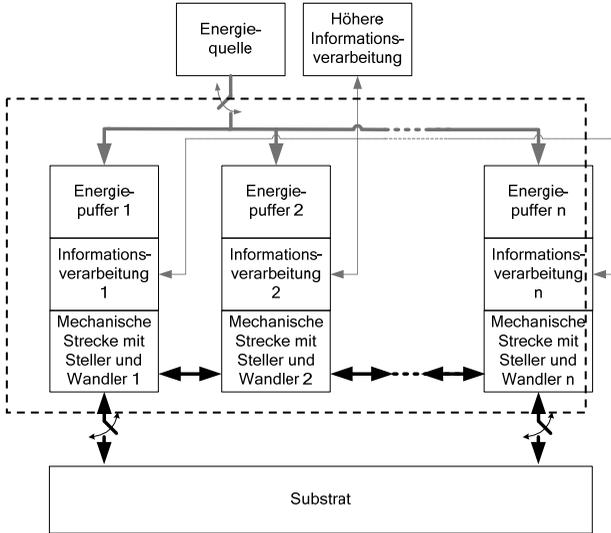


Abb. A2 – Modularisierungsvariante E_{int}I_{int}

Tab. A2 – Anzahl (Kopplungen, Module und Funktionsblöcke - Var. E_{int}I_{int})

Kriterien		Anzahl allgemein	Anzahl n=8
Kopplung	informationelle Kopplung	$n+1$	9
	mechanische Kopplung	$2n$	16
	elektrische Kopplung	$n+1$	9
Entwicklungsaufwand	Modulanzahl	n	8
	Summe der Funktionen	$3n$	24

A.1.3 Variante „E_{zen}I_{zen}“, Energie zentral, IV zentral

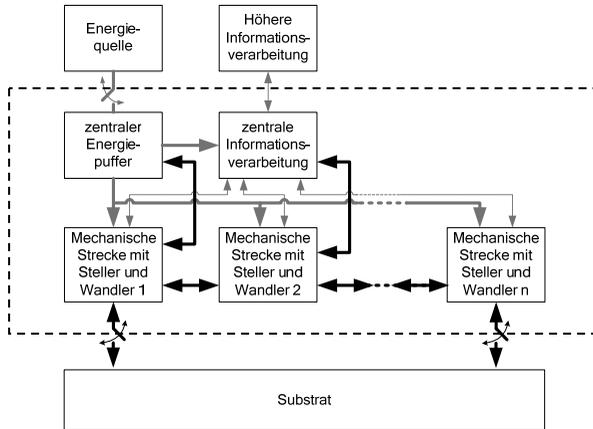


Abb. A3 – Modularisierungsvariante E_{zen}I_{zen}

Tab. A3 – Anzahl (Kopplungen, Module und Funktionsblöcke - Var. E_{zen}I_{zen})

Kriterien		Anzahl allgemein	Anzahl n=8
Kopplung	informationelle Kopplung	$2n+2$	18
	mechanische Kopplung	$2n+4$	20
	elektrische Kopplung	$n+4$	12
Entwicklungsaufwand	Modulanzahl	$n+2$	10
	Summe der Funktionen	$n+2$	10

A.1.4 Variante „E_{zenI_{int}}“ - Energie zentral, IV integriert

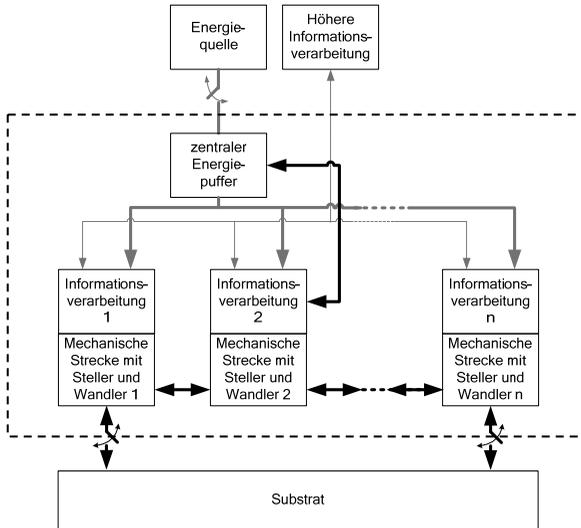


Abb. A4 – Modularisierungsvariante E_{zenI_{int}}

Tab. A4 – Anzahl (Kopplungen, Module und Funktionsblöcke - Var. E_{zenI_{int}})

Kriterien	Anzahl allgemein	Anzahl n=8	
Kopplung	informationelle Kopplung	n+1	9
	mechanische Kopplung	2n+2	18
	elektrische Kopplung	n+3	11
Entwicklungsaufwand	Modulanzahl	n+1	9
	Summe der Funktionen	2n+1	17

A.1.5 Variante „E_{int}I_{zen}“ - Energie zentral, IV integriert

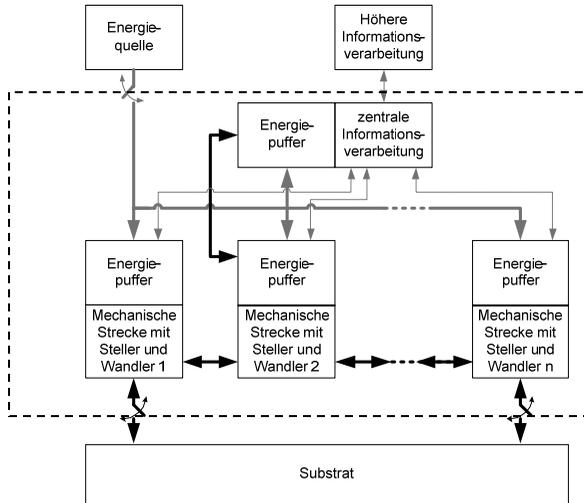


Abb. A5 – Modularisierungsvariante E_{int}I_{zent}

Tab. A5 – Anzahl (Kopplungen, Module und Funktionsblöcke - Var. E_{int}I_{zen})

Kriterien		Anzahl allgemein	Anzahl n=8
Kopplung	informationelle Kopplung	$2n+2$	18
	mechanische Kopplung	$2n+2$	18
	elektrische Kopplung	$n+2$	10
Entwicklungsaufwand	Modulanzahl	$n+1$	9
	Summe der Funktionen	$2n+2$	18

A.2 Übersicht Kletterroboter

Tab. A6 – Übersicht über die Kletterroboter

Nr	Name	Jahr	Staat	Einrichtung	Anwendung	Masse in kg	Geschwindigkeit in m/min	Hafttechnologie	Anzahl der Greifer	Fortbewegungssart	Literatur
1	Roma I	2000	Spanien	University Carlos III of Madrid	Forschung	75	1	anpressend passiv	2	SDL	[Balaguer et al. 2000]
2	3D-Climber	2008	Portugal	University of Coimbra	Forschung	42	1	anpressend passiv	2	SDL	[Tavakoli et al. 2008]
3	ALFRED	2001	Deutschland	Universität Lübeck	Forschung	3,1	k.A.	flüssig-statisch aktiv	2	SDL	[Maehle 27.10.2009]
4	Alicia I	2002	Italien	Università degli Studi di Catania	Forschung	2	k.A.	flüssig-dynamisch aktiv	1	RCB	[Loongo et al. 2006]
5	Alicia II	2004	Italien	Università degli Studi di Catania	Forschung	4	2	flüssig-dynamisch aktiv	1	RCB	[Loongo et al. 2006]
6	Alicia III	2006	Italien	Università degli Studi di Catania	Forschung	20	k.A.	flüssig-dynamisch aktiv	3	RCL	[Loongo et al. 2006]
7	CityClimber II	2007	USA	City University of New York	Forschung	1	k.A.	flüssig-dynamisch aktiv	1	RCB	[Xiao et al. 2007]
8	Cleanbot II	2004	China	City University of Hong Kong	Forschung	22	k.A.	flüssig-statisch aktiv	ca.50	RCB	[Zhu et al. 2004]
9	Climbing SuperBot	2007	USA	University of Southern California	Forschung	1	k.A.	anpressend passiv	2	SCL	[Ranasinghe et al. 2007]
10	CRAWLER	2003	USA	University of Utah	Forschung	0,45	k.A.	flüssig-statisch passiv	2	SDL	[Minor et al. 2003]
11	CROMSCI	2008	Deutschland	Universität Kaiserslautern	Forschung	25	k.A.	flüssig-dynamisch aktiv	3	RCB	[Hillenbrand et al. 2008]
12	DEXTER	2004	Deutschland	Universität Lübeck	Forschung	3,7	k.A.	flüssig-statisch passiv	2	SDL	[Bockmann 2006]
13	Digbot	2009	USA	Case Western University Cleveland	Forschung	1,5	k.A.	anpressend aktiv	6	SDL	[Palmer et al. 2009]
14	Dynamical Vertical Robot	2007	USA	University of Pennsylvania	Forschung	2,4	k.A.	eindringend passiv	2	SDL	[Clark et al. 2007]
15	FLIPPER	2003	USA	University of Utah	Forschung	0,34	k.A.	flüssig-statisch passiv	2	SDL	[Minor et al. 2003]
16	Gecko III Plus	2008	Schweiz	Niederberger-Engineering	Produkt	54	3	flüssig-statisch aktiv	22	SDL	[Niederberger-Engineering-AG 2008]
17	GeckoBot	2006	USA	Carnegie Mellon University	Forschung	0,1	0,6	elektrostatisch passiv	4	SDL	[Uver et al. 2006]
18	Hyperion	2001	Japan		Forschung	10	1,2	flüssig-statisch aktiv	4	SDL	[Yoneda et al. 2001]
19	Magbot 1	2009	USA	Innovation First, Inc.	Produkt	1,6	k.A.	magnetisch passiv	4	RCL	[Innovation First 2009a]
20	Magbot 2	2009	USA	Innovation First, Inc.	Produkt	0,9	k.A.	magnetisch passiv	88	RCB	[Innovation First 2009b]
21	Magbot 3	2009	USA	Innovation First, Inc.	Produkt	2,2	k.A.	magnetisch passiv	195	RCL	[Innovation First 2009b]
22	MagneBike	2009	Schweiz	EPFL	Forschung	3,5	2,7	magnetisch passiv	2	RCL	[Tschöke et al. 2007]
23	Mate-1	2008	Schweiz	Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne	Forschung	1,05	k.A.	anpressend passiv	2	SDL	[Scheidtger et al. 2006]
24	Max V	2001	Deutschland	Universität Aalen	Forschung	25	k.A.	flüssig-statisch aktiv	32	RCB	[Schmieder 2001]
25	MiniWhegs	2007	USA	Case Western University Cleveland	Forschung	0,12	k.A.	elektrostatisch passiv	16	RDL	[Gorb et al. 2007]

Fortsetzung Tab. A6 – Übersicht über die Kletterroboter

Nr	Name	Jahr	Staat	Einrichtung	Anwendung	Masse in kg	Geschwindigkeit in m/min	Hafttechnologie	Anzahl der Greifer	Fortbewegung	Literatur
26	Modular Climbing Robot	2008	China	Shanghai Jaotong University	Forschung	20	k.A.	magnetisch passiv	4	RCL	[Yangjiong et al. 2008]
27	MRVALLSPECT II	2004	Korea	Sungkyunkwan University	Forschung	20	0,5	flüssig stat aktiv	12	SDL	[Choi et al. 2004]
28	RATNIC	2008	Deutschland	Tetra GmbH	Forschung	1,1	k.A.	apressend passiv	2	SDL	[Mämpel et al. 2010]
29	RATNIC light	2007	Deutschland	Tetra GmbH	Forschung	0,7	k.A.	apressend passiv	2	SDL	[Mämpel et al. 2008b]
30	RISE V1	2006	USA	Boston Dynamics	Forschung	3	k.A.	eindringend passiv	6	SDL	[Saunders et al. 2006]
31	RISE V3	2009	USA	Boston Dynamics	Forschung	5,4	k.A.	eindringend passiv	6	SDL	[Haynes et al. 2009]
32	Roma II	2003	Spanien	University Carlos III of Madrid	Forschung	25	1,5*	flüssig stat aktiv	2	SDL	[Nardelli et al. 2002]
33	SCID	2001	Italien	Università degli Studi di Catania	Forschung	0,15	k.A.	magnetisch aktiv	2	SDL	[Longo et al. 2001]
34	Screenbot	2008	USA	Case Western University Cleveland	Forschung	0,126	k.A.	eindringend passiv	6	RDL	[Wile et al. 2008]
35	Shady3D	2007	USA	MIT, Cambridge, MA	Forschung	0,34	k.A.	apressend passiv	2	SDL	[Yoon et al. 2007]
36	Sharif Pole Climber	2005	Iran	Sharif University of Technology, Tehran	Forschung	16	k.A.	apressend passiv	2	SDL	[Tavakoli et al. 2005]
37	Spinybot	2006	USA	Stanford University	Forschung	0,4	0,12	eindringend passiv	6	SDL	[Asbeck et al. 2006]
38	SRI Tracked	2008	USA	SRI International	Forschung	0,22	k.A.	elektrostatisch aktiv	1	RCB	[Prahad et al. 2008]
39	SRI Worm	2008	USA	SRI International	Forschung	0,02	k.A.	elektrostatisch aktiv	2	SDL	[Prahad et al. 2008]
40	Stickybot	2008	USA	Stanford University	Forschung	0,45	k.A.	elektrostatisch passiv	4	SDL	[Santos et al. 2008]
41	Tankbot	2009	USA	Carnegie Mellon University	Forschung	0,06	k.A.	elektrostatisch passiv	2	RCB	[Urver et al. 2009]
42	Tracked wheel Climbing Robot	2008	Korea	Seoul National University	Forschung	14	15	flüssig stat aktiv	24	RCB	[Kim et al. 2008]
43	TREPA D150	2008	Spanien	DJSAI Universidad Politecnica de Madrid	Forschung	20,5	k.A.	apressend passiv	2	SDL	[Saltarén et al. 2007]
44	TREPA D250	2008	Spanien	DJSAI Universidad Politecnica de Madrid	Forschung	25,5	k.A.	apressend passiv	2	SDL	[Saltarén et al. 2007]
45	TREPA D350	2008	Spanien	DJSAI Universidad Politecnica de Madrid	Forschung	31	k.A.	apressend passiv	2	SDL	[Saltarén et al. 2007]
46	Tripillar	2009	Schweiz	EPFL	Forschung	0,214	2,4	magnetisch passiv	34	RCB	[Rochat et al. 2009]
47	Vibrating Suction Cup Robot	2009	Deutschland	Universität Hamburg	Forschung	2	k.A.	flüssig stat aktiv	20	SDL	[Zhang 2007]
48	Waalbot	2005	USA	Carnegie Mellon University	Forschung	0,1	3,6	elektrostatisch passiv	6	RDL	[Urver et al. 2006]
49	Wallwalker	2007	Japan	Kawagaya University	Forschung	3	k.A.	flüssig stat aktiv	1	RCB	[Miyake et al. 2007]
50	Larva	2008	Korea	Sungkyunkwan University	Forschung	3,3	6	flüssig dyn aktiv	1	RCB	[Song et al. 2008]

A.3 Nachrechnungen

A.3.1 Klemmverbindung zwischen Modul und Koppellement

- Spannungsquerschnitt M3 $A_s = 5,03 \text{ mm}^2$
- Anzahl der Schrauben $n_s = 4$
- Lochkreisradius $r = 24 \text{ mm}$
- Moment $M = 6 \text{ Nm}$
- Kraft $F = 30 \text{ N}$
- Haftreibungskoeffizient $\mu = 0,2$

Die notwendige Schraubenkraft F_{Schr} bei einer Scherbelastung zwischen Koppellement und Modul berechnet sich zu

$$F_{Schr} = \frac{1}{4} \left(\frac{M_s}{r_s} + F_s \right) \frac{1}{\mu} = \frac{1}{4} \left(\frac{6 \text{ Nm}}{0,024 \text{ m}} + 30 \text{ N} \right) \frac{1}{0,2} = 350 \text{ N} \quad (28)$$

Bei Verwendung von Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 ergibt sich folgende zulässige Zugspannung:

$$\sigma_{zul} = \frac{R_{e,8.8}}{S} = \frac{640}{2} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 320 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (29)$$

Der erforderliche Spannungsquerschnitt $A_{S,erf}$ der Schraube ergibt sich zu

$$A_{S,erf} = 1,3 \frac{F_{Schr}}{\sigma_{zul}} = 1,3 \frac{350 \text{ N}}{320 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 1,4 \text{ mm}^2 \quad (30)$$

Der erforderliche Spannungsquerschnitt liegt deutlich unter dem Spannungsquerschnitt der Schraube mit dem Gewinde M3. Auf kleinere Schrauben wird aus Handhabungsgründen verzichtet. Dies bedeutet aber, dass schon zwei Schrauben ausreichend, um die mechanische Kopplung herzustellen.

A.4 Evaluation des System anhand des Spezialsystems RATNic

A.4.1 Steuerungssoftware

Die Steuerung des Kletterroboters erfolgt durch einen Nutzer per Mehrkoordinaten- Eingabegerät. Die ausführliche Dokumentation ist in [Obermaier 2009] zu finden. Das gewählte Gamepad verfügt über die Möglichkeit der Eingabe von Steuersignal in Form von vier analogen sowie mehrerer digitaler Signale. Der Nutzer beobachtet den Kletterroboter und generiert daraufhin die Steuersignale.

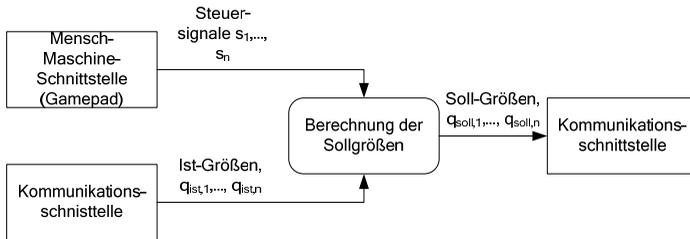


Abb. A6 – Datenflussdiagramm der Steuerungssoftware. Die Vorgabe der Steuersignale erfolgt durch einen Nutzer per Gamepad

Die Steuersignale s_n müssen in Sollwerte für die Antriebe umgerechnet und anschließend über die Funkschnittstelle an den Kletterroboter übertragen werden. Die Programmierung der notwendigen Berechnungsalgorithmen erfolgt unter der Software LABVIEW® der Fa. NATIONAL INSTRUMENTS™. Im Folgenden soll kurz auf die Berechnung der Sollgrößen aus den Ist- und Steuergrößen eingegangen werden.

A.4.2 Berechnung der Sollgrößen unter LabView®

Der Kletterroboter in der Vergleichskonfiguration kann die vier folgenden kinematischen Strukturen einnehmen. Dabei hängen die Strukturen von dem Zustand der Greifer 1 und 2 ab. Diese können entweder am Substrat „fixiert“ oder „frei“ sein. Durch die Anzahl der Greifer wird der mechanische Freiheitsgrad der Struktur beeinflusst.

Ist maximal ein Greifer am Substrat fixiert, so ist der mechanische Freiheitsgrad $f = 3$. Die Parameter q_1, q_2, q_3 entsprechen dabei den Gelenkwinkeln und können frei eingestellt werden. Sind beide Greifer am Substrat ist der mechanische Freiheitsgrad $f = 0$, die Struktur ist voll bestimmt und damit zwangsläufig.

Das hat zur Folge, dass die Gelenkparameter q_1, q_2, q_3 während der gesamten Dauer des Zustands konstant gehalten werden müssen.

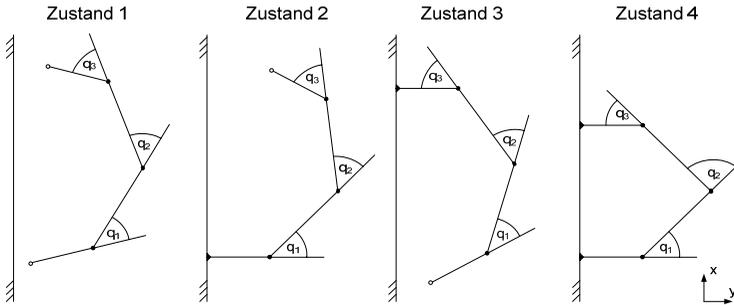


Abb. A7 – Zustände definiert durch die kinematische Struktur

Für die Steuerung werden diese vier unterschiedlichen Strukturen als Zustände interpretiert. In der Software können diese vier Zustände in einem Zustandsautomaten abgebildet werden. Für jeden Zustand werden eingegebene Steuersignale unterschiedlich verarbeitet.

Tab. A7 – Abhängigkeiten der Sollgrößen für die Antriebe

Zustand	Greifer 1	Greifer 2	Freiheitsgrad	Berechnung der Sollgrößen $q_{soll,1}, q_{soll,2}, q_{soll,3}$
1	frei	frei	$f = 3$	direkte Steuerung der Antriebsachsen $q_{soll,1} = f(q_{ist,1}, \dot{s}_1)$ $q_{soll,2} = f(q_{ist,2}, \dot{s}_2)$ $q_{soll,3} = f(q_{ist,1}, \dot{s}_3)$
2	fixiert	frei	$f = 3$	Berechnung der inversen Kinematik 1 $q_{soll,1} = f(q_{ist,1}, \dot{s}_1, \dot{s}_2, \dot{s}_3)$ $q_{soll,2} = f(q_{ist,2}, \dot{s}_1, \dot{s}_2, \dot{s}_3)$ $q_{soll,3} = f(q_{ist,3}, \dot{s}_1, \dot{s}_2, \dot{s}_3)$
3	frei	fixiert	$f = 3$	Berechnung der inversen Kinematik 2 $q_{soll,1} = f(q_{ist,1}, \dot{s}_1, \dot{s}_2, \dot{s}_3)$ $q_{soll,2} = f(q_{ist,2}, \dot{s}_1, \dot{s}_2, \dot{s}_3)$ $q_{soll,3} = f(q_{ist,3}, \dot{s}_1, \dot{s}_2, \dot{s}_3)$
4	fixiert	fixiert	$f = 0$	Parameter sind konstant $q_{soll,1} = q_{ist,1}$ $q_{soll,2} = q_{ist,2}$ $q_{soll,3} = q_{ist,3}$

Die inverse Kinematik der Strukturen für den Zustand 2 und 3 ist jeweils mit Hilfe der inversen Jacobi-Matrix J^{-1} berechnet. Das Vorgehen dabei entspricht dem in [McCloy et al. 1989, S. 141 ff.] dargestellten.

A.4.3 Messmethode

Für den Vergleich der Roboter müssen folgende Größen gemessen werden, aus denen sich dann die Vergleichsparameter berechnet lassen:

- Schrittlänge l_s
- Schrittdauer t_s
- der Verlauf Versorgungsspannung der Roboter $U_v(t)$
- der Verlauf des Stromes $I_v(t)$

Es wird ein Substrat mit einem Durchmesser von $d_s = 40 \text{ mm}$ senkrecht befestigt. Für die Messung der Schrittlänge l_s wird eine metrischen Maßverkörperung mit einer Auflösung von $\Delta l_s = 1 \text{ mm}$ auf dem Substrat angebracht. Die vertikale Position für zu Beginn und am Ende des Bewegungszyklus' abgelesen.

Die Versorgungsspannung U_v wird über eine Messleitung zwischen Akkumulator und abgegriffen. Zur Messung des Stromes I_v wird ein Messwiderstand mit $R = 0,1 \Omega$ verwendet, der in die Anschlussleitung des Roboters eingebracht wird. Die stromproportionale, über dem Widerstand abfallende Spannung U_{Iv} wird gemessen. Die Verläufe $U_v(t)$ und $U_{Iv}(t)$ werden über ein Datenerfassungssystem der Fa. NATIONAL INSTRUMENTSTM aufgezeichnet. Es wird eine Messfrequenz von $f_{\text{Mess}} = 1000 \text{ Hz}$ verwendet, um die hochfrequenten Änderungen im Strom- und Spannungsverlauf messen zu können.

Für die Bestimmung der Zyklusdauer t_s wird ein Trigger verwendet. Dieser wird zu Beginn und am Ende des Kletterzyklus' betätigt und synchron zu den Spannungsverläufen $U_v(t)$ und $U_{Iv}(t)$ aufgezeichnet.

Um Fehler zu minimieren, werden die Werte beim nachsetzenden Klettern über jeweils fünf Zyklen gemittelt. Der Trigger wird zu Beginn des ersten und direkt nach Abschluss des fünften Bewegungszyklus' betätigt. Bei dem überschlagenden Klettern ist begründet mit der kurzen Substratlänge nur ein vollständiger Bewegungszyklus möglich. Die Werte werden hier für nur einen Zyklus aufgezeichnet.

A.4.4 Messaufbau

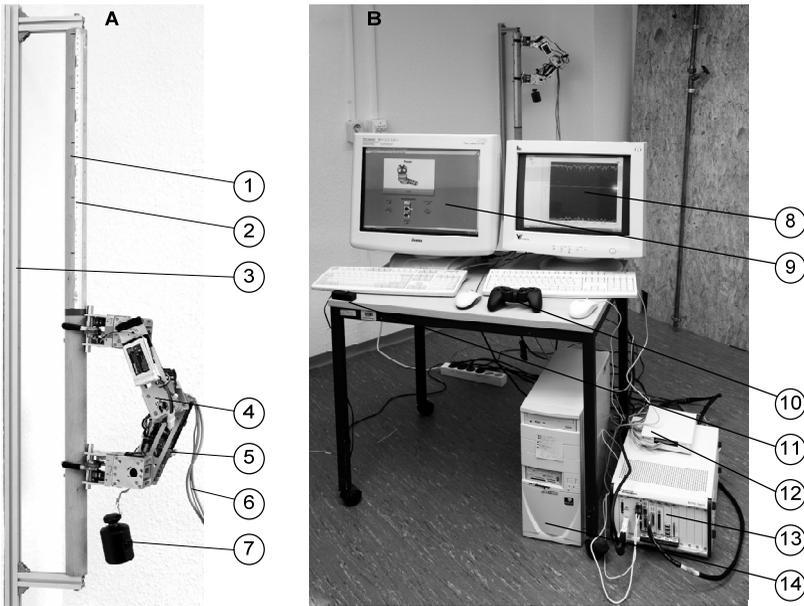


Abb. A8 – Messaufbau zur Erfassung der Kletterparameter. Gemessen werden kinematische und energetische Größen sowie die maximale Zuglast. (1) Substrat, (2) Maßverkörperung, (3) Wandhalterung, (4) Roboter, (5) Messelektronik, (6) Messleitung, (7) Zusatzmasse (payload), (8) Monitor der Datenerfassung, (9) Monitor der Steuerung, (10) Gamepad, (11) Trigger, (12) Anschlussbox, (13) Rechner mit Datenerfassung, (14) Rechner mit Steuersoftware

Der Messaufbau ist in Abb. A8 dargestellt. Die Roboter (4) (hier dargestellt die Vergleichskonfiguration) klettern dafür auf einem senkrechten Substrat (1) in der negativen Richtung des Schwerkraftvektors. Zum Messen der Position ist eine metrische Maßverkörperung (2) auf dem Substrat befestigt. Das Gestell (3) ist an der Wand verschraubt. Für die Messung der Versorgungsspannung und der Stromaufnahme ist eine Messelektronik (5) am Roboter angebracht. Die Messsignale werden über eine Messleitung (6) an eine Anschlussbox (12) eines Datenerfassungssystems (13) übertragen. Bei dem Datenerfassungssystem handelt es sich um ein PXI-System der Fa. NATIONAL INSTRUMENTS. Die genutzte Datenerfassungskarte ist die PXI-6229. Die Messdaten werden grafisch dargestellt (8), das Starten und Stoppen der Datenaufnahme wird durch einen als Trigger funktionierenden Handschalter (11) ermöglicht.

Die Steuerung der Roboter erfolgt über einen PC (14), an dem das Steuergerät (10) angeschlossen ist. Eine grafische Oberfläche (9), welche die aktuellen Daten des Roboters darstellt, unterstützt den Nutzer.

Für die Bestimmung der Tragfähigkeit wird eine Masse (7) an den Roboter angehängt (hier durch ein Massestück von 1 kg exemplarisch dargestellt).

A.4.5 Abschätzung der Messunsicherheit

Für den direkten Vergleich der beiden Roboter, wird jeweils derselbe Messaufbau verwendet. Systematische Fehler, welche evtl. durch die Messgeräte entstehen, sind bei den Messungen beider Systeme vorhanden. Die Zeit- und Positionsmessungen werden jeweils durch dieselbe Person durchgeführt. Auch so soll der Fehler durch unterschiedliches Ablesen, respektive unterschiedlichen Auslösens des Triggerknopfes minimiert werden. Die Messleitungen werden am Roboter befestigt. Die Roboter müssen die zusätzliche Masse ziehen. Eine genaue Bestimmung der Kraft, welche durch die Masse der Leitungen verursacht wird, ist nicht möglich.

Zufällige Fehler entstehen:

- beim Ablesen der Kletterhöhe,
- beim Messen der Kletterzeit,
- bei der Bestimmung der Masse der Roboter bei Messung der elektrischen Spannung,
- bei Messung des elektrischen Stroms

Zufällige Abweichungen entstehen bei Messungen durch Ableseabweichung beim Maßstab und durch unterschiedliche Reaktion beim Auslösen des Triggersignals. Die Genauigkeit beim Ablesen der Maßstabes sollte in Größe der Auflösung des Maßstabes liegt.

$$\Delta x_s = \pm 2 \text{ mm} \quad (31)$$

Die Messung der Schrittlänge erfolgt durch zweimaliges Ablesen des Start und des Endwertes.

$$l_s = x_2 - x_1 \quad (32)$$

Der Fehler der Schrittlänge berechnet sich somit zu

$$\Delta l_s = \Delta x_2 + \Delta x_1 = \pm 4 \text{ mm} \quad (33)$$

Die Genauigkeit beim Betätigen des Triggersignals wird mit einer halben Sekunde geschätzt.

$$\Delta t_r = \pm 0,5 s \quad (34)$$

Bei fünf Bewegungszyklen entspricht die Unsicherheit der Zyklusdauer dann

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t_{T2} + \Delta t_{T1}}{3} = \pm 0,33 s \quad (35)$$

Die Messgenauigkeit der Waage KERN EMB-2200-0 ist mit

$$\Delta m = \pm 0,002 kg \quad (36)$$

angegeben.

Die Messunsicherheit der normierten Klettergeschwindigkeit berechnet sich damit zu

$$\Delta v^* = \left| \frac{1}{t_s l_m} \right| \Delta l_s + \left| -\frac{l_s}{t_s^2 l_m} \right| \Delta t_s + \left| -\frac{l_s}{t_s l_m^2} \right| \Delta l_m \quad (37)$$

und die der normierten Schrittlänge zu

$$\Delta l_s^* = \left| \frac{1}{l_m} \right| \Delta l_s + \left| -\frac{l_s}{l_m^2} \right| \Delta l_m \quad (38)$$

Die Messunsicherheit des Wirkungsgrads berechnet sich zu

$$\Delta \eta_K = \left| \frac{g l_s}{P_{el} t_s} \right| \Delta m + \left| \frac{m g}{P_{el} t_s} \right| \Delta l_s + \left| -\frac{m g l_s}{P_{el}^2 t_s} \right| \Delta P_{el} + \left| \frac{m g l_s}{P_{el} t_s^2} \right| \Delta t_s \quad (39)$$

Die Berechnung der Messunsicherheiten erfolgt mit Hilfe des linearen Fortpflanzungsgesetzes. Als Messunsicherheit der elektrischen Leistung wird die Standardabweichung verwendet, welche bei einer Leerlaufmessung ermittelt wurde.

$$\Delta P_{el} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{el,i} - \bar{P}_{el})^2}$$

$$\Delta P_{el} = 0,05 W \quad (40)$$

A.4.6 Messung der Zusatzmasse an RATNIC

Datum: 18.02.10

- Roboter: RATNIC V2.0
- Versorgung: Akku on board
- Substrat: 40 mm, Kunststoff
- Steuerung: Nutzer per Gamepad
- Bewegungsablauf Bahnsteuerung

Befestigung am Roboter: am Hinterkörper per Seil, hängend

Tab. A8 – Messung der Zusatzmasse an RATNIC

Versuch Nr.	Traglast m_T in kg	Status	Bemerkung
1	0,0	erfolgreich	
2	0,1	erfolgreich	
3	0,2	nicht erfolgreich	Hinterkörper wird nicht vollständig an das Substrat gesetzt, hinterer Greifer schließt nicht
4	0,2	nicht erfolgreich	Hinterkörper wird nicht vollständig an das Substrat gesetzt, hinterer Greifer schließt nicht
5	0,2	nicht erfolgreich	Hinterkörper wird nicht vollständig an das Substrat gesetzt, hinterer Greifer schließt nicht

Bemerkung: Auf das Anbringen größerer Massen wird verzichtet.

A.4.7 Messung der Zusatzmasse an der Vergleichskonfiguration

Datum: 18.02.10

- Roboter: Vergleichskonfiguration
- Versorgung: Akku on board
- Substrat: 40 mm, Holz
- Steuerung: Nutzer per Gamepad
- Bewegungsablauf: manuelle Steuerung

Befestigung am Roboter: am unteren Bewegungsmodul, hängend

Tab. A9 – Messung der Zusatzmasse an der Vergleichskonfiguration

Versuch Nr.	Traglast m_T in kg	Status	Bemerkung
1	0,0	erfolgreich	
2	0,1	erfolgreich	
3	0,2	erfolgreich	
4	0,3	erfolgreich	
5	0,4	erfolgreich	
6	0,5	erfolgreich	
7	0,6	erfolgreich	
8	0,7	erfolgreich	
9	0,8	erfolgreich	
10	0,9	erfolgreich	
11	1,0	erfolgreich	starke Erwärmung der Antriebe zu beobachten
12	1,1	erfolgreich	starke Erwärmung der Antriebe zu beobachten
13	1,2	erfolgreich	starke Erwärmung der Antriebe zu beobachten
14	1,3	erfolgreich	Belastung des unteren Servoantriebs mechanisch grenzwertig, starke Erwärmung der Antriebe
15	1,4	nicht erfolgreich	Abbruch, Servoantrieb im unteren Bewegungsmodul kann Sollposition nicht erreichen

Bemerkung: Zur Vermeidung von Defekten wird auf eine Wiederholung bei einer Zugmasse von $m_T = 1,4$ kg verzichtet.

A.4.8 Messprotokoll – Vergleichskonfiguration

Datum: 20.02.2010

- Roboter: Vergleichskonfiguration
- Versorgung: Akku on board
- Substrat: 40 mm, Holz
- Steuerung: Nutzer per Gamepad
- Bewegungsablauf: manuelle Steuerung

Tab. A10 – Parameter der Vergleichskonfiguration für die Experimente

Größe	Wert
Masse des Roboters m in kg	1,59
Messunsicherheit Δm in kg	0,01
mittlere Länge l_m in mm	282
Messunsicherheit Δl_m in mm	5

Ermittelte Parameter:

- Schrittlänge l_s
- normierte Schrittlänge l_s^*
- Schrittdauer t_s
- Klettergeschwindigkeit v_s
- normierte Klettergeschwindigkeit v_s^*
- elektrische Energie pro Schritt E_d
- potentielle Energie pro Schritt E_{pot}
- Wirkungsgrad des Kletterns η_K

Bestimmt wurden jeweils der Mittelwert \bar{x} und die Standardabweichung der Stichprobe s .

Messdaten für das nachsetzende Bewegungsmuster

Anzahl der Schrittzyklen: 3

Tab. A11 – Messwerte (Vergleichskonfiguration, nachsetzend)

	l_s in mm	l_s^* in KL	t_s in s	v_s in mm/s	v_s^* in KL/s	E_{el} in Ws	E_{pot} in Ws	η_K
1	56	0,20	10	5	0,02	256	0,9	0,3%
2	57	0,20	11	5	0,02	240	0,9	0,4%
3	58	0,20	9	7	0,02	267	0,9	0,3%
4	55	0,20	10	5	0,02	237	0,9	0,4%
5	56	0,20	9	6	0,02	278	0,9	0,3%
6	57	0,20	9	7	0,02	303	0,9	0,3%
\bar{x}	57	0,20	10	6	0,02	263	0,9	0,3%
s	1	0,00	1	1	0,00	25	0,0	0,0%

Tab. A12 – Messunsicherheiten (Vergleichskonfiguration, nachsetzend)

Versuch	Δt_s in s	Δl_s in mm	Δl_s^* in KL	Δv_s in mm/s	Δv_s^* in KL/s	$\Delta \eta_K$
1	0,33	1,3	0,01	0,1	0,001	0,01%
2	0,33	1,3	0,01	0,1	0,001	0,01%
3	0,33	1,3	0,01	0,2	0,002	0,01%
4	0,33	1,3	0,01	0,1	0,001	0,01%
5	0,33	1,3	0,01	0,1	0,002	0,01%
6	0,33	1,3	0,01	0,2	0,002	0,01%

Bewegungsmuster – überschlagend

Anzahl der Schrittzyklen: 1

Tab. A13 – Messwerte (Vergleichskonfiguration, überschlagend)

Nr.	l_s in <i>mm</i>	l_s^* in <i>KL</i>	t_s in <i>s</i>	v_s in <i>mm/s</i>	v_s^* in <i>KL/s</i>	E_{el} in <i>Ws</i>	E_{pot} in <i>Ws</i>	η_K
1	511	1,81	21	25	0,09	256	8,0	3,1%
2	518	1,84	18	29	0,10	240	8,1	3,4%
3	507	1,80	22	23	0,08	267	7,9	3,0%
4	504	1,79	21	24	0,09	237	7,9	3,3%
5	515	1,83	16	31	0,11	278	8,0	2,9%
6	510	1,81	20	25	0,09	303	8,0	2,6%
\bar{x}	511	1,81	20	26	0,09	263	8,0	3,0%
s	5	0,02	2	3	0,01	25	0,1	0,3%

Tab. A14 – Messunsicherheiten (Vergleichskonfiguration, überschlagend)

Versuch	Δt_s in <i>s</i>	Δl_s in <i>mm</i>	Δl_s^* in <i>KL</i>	Δv_s in <i>mm/s</i>	Δv_s^* in <i>KL/s</i>	$\Delta \eta_K$
1	1	4	0,05	0,2	0,01	0,1%
2	1	4	0,05	0,2	0,01	0,1%
3	1	4	0,05	0,2	0,01	0,1%
4	1	4	0,05	0,2	0,01	0,1%
5	1	4	0,05	0,2	0,01	0,1%
6	1	4	0,05	0,2	0,01	0,1%

A.4.9 Messprotokoll – RATNIC

Datum: 19.02.2010

- Roboter: RATNIC
- Versorgung: Akku on board
- Substrat: 40 mm, Kunststoff
- Steuerung: Nutzer per Gamepad
- Bewegungsablauf: automatisch

Tab. A15 – Parameter von RATNIC für die Experimente

Größe	Wert
Masse des Roboters m in kg	1,15
Messunsicherheit Δm in kg	0,01
mittlere Länge l_m in mm	419
Messunsicherheit Δl_m in mm	5

Ermittelte Parameter:

- Schrittlänge l_s
- normierte Schrittlänge l_s^*
- Schrittdauer t_s
- Klettergeschwindigkeit v_s
- normierte Klettergeschwindigkeit v_s^*
- elektrische Energie pro Schritt E_{el}
- potentielle Energie pro Schritt E_{pot}
- Wirkungsgrad des Kletterns η_K

Bestimmt wurden jeweils der Mittelwert \bar{x} und die Standardabweichung der Stichprobe s .

Anzahl der Schrittzyklen pro Messung: 3

Tab. A16 – Messwerte RATNIC, nachsetzend)

Nr.	l_s in mm	l_s^* in KL	t_s in s	v_s in mm/s	v_s^* in KL/s	E_{el} in Ws	E_{pot} in Ws	η_K
1	62	0,15	5	13	0,03	60	0,7	1,2%
2	65	0,16	5	14	0,03	53	0,7	1,4%
3	64	0,15	5	12	0,03	49	0,7	1,5%
4	63	0,15	5	13	0,03	52	0,7	1,4%
5	63	0,15	5	13	0,03	48	0,7	1,5%
6	67	0,16	5	13	0,03	61	0,8	1,2%
\bar{x}	64	0,15	5	13	0,03	61	0,7	1,4%
s	2	0,00	0	1	0,00	5	0,0	0,1%

Tab. A17 – Messunsicherheiten der Messwerte (RATNIC, nachsetzend)

Versuch	Δt_s in s	Δl_s in mm	Δl_s^* in KL	Δv_s in mm/s	Δv_s^* in KL/s	$\Delta \eta_K$
1	0,33	1,3	0,00	0,3	0,003	0,05%
2	0,33	1,3	0,01	0,3	0,003	0,05%
3	0,33	1,3	0,01	0,3	0,003	0,05%
4	0,33	1,3	0,00	0,3	0,003	0,05%
5	0,33	1,3	0,00	0,3	0,003	0,05%
6	0,33	1,3	0,01	0,3	0,003	0,05%

