

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 |

VERZEICHNISSE

| | | |
|-------|---|-----------|
| 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 | Energiespeichermodule | 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 |

VERZEICHNISSE

| | | |
|-------------|---|------------|
| 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 Spezia systems 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 |

VERZEICHNISSE

| | | |
|-------|---|-----|
| 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 |